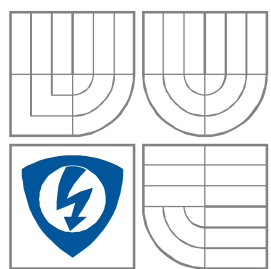


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

URČENÍ SMĚRU POHLEDU EYE GAZE TRACKING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR BASTL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV RICHTER, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Petr Bastl
Ročník: 2

ID: 98359
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Určení směru pohledu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Stanovte možnosti lokalizace (určení polohy) objektu na základě směru pohledu (očí). Na základě nastudovaných informací a rozboru úlohy sestavte měřicí zařízení, vytvořte sadu snímků pro zpracování a stanovte možnosti takovéto měřicí sestavy. Navrhněte a ověřte algoritmy pro detekci polohy oka a mechanismus určení směru a místa pohledu. Soustředte se na zjištění přesnosti a opakovatelnosti měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Kraus K.: Photogrammetrie 1 und 2, Ummler / Bonn, 1996
Žára J., Beneš B., Sochor J., Felkel P.: Moderní počítačová grafika, Computer Press, 1998, ISBN 80-251-0454-0
Hlaváč V., Šonka M.: Počítačové vidění, Grada, Praha 1992, ISBN 80-85424-67-3
Faugeras O.: Three-Dimensional Computer Vision, The MIT Press 1993

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou sledování oka a určování směru a místa pohledu. Je uveden přehled metod pro určování směru pohledu. Pro vlastní realizaci je vybrána a navržena metoda přímého zjišťování směru pohledu pomocí jedné kamery a umožňující volný pohyb hlavy uživatele. Jsou popsány algoritmy pro zpracování a popis obrazu. Střed zorničky je určován genetickým algoritmem hledajícím elipsu. Dále jsou navrženy postupy kalibrace měřicího zařízení. Práce dále řeší problematiku určení polohy oka směru jeho pohledu. Nakonec je uvedeno srovnání přesnosti s podobnými projekty.

Klíčová slova

Směr pohledu, místo pohledu, detekce zorničky, genetický algoritmus, detekce elipsy

Abstract

This thesis deals with the eye gaze tracking and determining the direction and the place of the view. The overview of methods for determining the view direction is provided here. The direct 3D gaze estimation technique is proposed and implemented. The eye gaze can be estimated by using a single camera and under nature head movement. This paper describes the algorithms for the image processing and the image description. The center of the pupil is determined by the genetic algorithm for the ellipse detection. The procedures of the instrumentation calibration are proposed here as well. The work also addresses the issue of the determining the eye location. Finally, the comparison of the accuracy with similar projects is mentioned in my thesis.

Keywords

Eye gaze tracking, point of view, pupil detection, genetic algorithm, ellipse estimation

Bibliografická citace:

BASTL, P. *Určení směru pohledu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 59s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Určení směru pohledu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miloslav Richter, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Oko jako kamera	9
2	Metody sledování zraku	11
2.1.1	Mechanické snímání.....	11
2.1.2	Elektrostatické snímání	12
2.1.3	Optické snímání	13
2.2	Náhlavní systémy	14
2.3	Bezkontaktní systémy	16
2.3.1	2D mapovací techniky.....	16
2.3.2	Přímé zjišťování 3D směru pohledu.....	16
3	Přímé zjišťování 3D směru pohledu.....	19
3.1	Model oka a rozbor metody	19
3.2	Konfigurace měřicí sestavy.....	21
3.3	Kalibrace kamery	23
3.4	Kalibrace měřicí soustavy	25
3.5	Určení místa pohledu	27
4	Zpracování obrazu.....	29
4.1	Genetický algoritmus pro hledání elipsy.....	33
4.1.1	Generování jedinců	34
4.1.2	Hodnotící funkce.....	36
4.1.3	Selekce, křížení, mutace, elitismus	36
4.2	Zvláštnosti snímání oka.....	37
4.3	Výsledky zpracování obrazu	38
5	Parametry oka.....	40
5.1	Určení polohy oka a polohy zorničky	41
5.1.1	Teoretické odlesky	41
5.1.2	Porovnávání odlesků	42
5.1.3	Určení polohy středu zorničky	43
5.1.4	Průsečík přímky a koule.....	44
5.2	Kalibrace poloměru rohovky.....	45
5.3	Kalibrace vzdálenosti zorničky	47
6	Experiment	48

6.1	Srovnání	50
7	Závěr.....	52

1 ÚVOD

První pokusy o sledování očních pohybů proběhly na konci devatenáctého století, kdy v roce 1879 francouzský oftalmolog Louis Émile Javal zjistil, že při čtení textu oko čtenáře dělá pausy a neprochází text kontinuálně. Přesné sledování se provádělo až po válce. První metody byly invazivní – využívaly přímého kontaktu měřicího přístroje s okem subjektu. Díky vyspělé počítačové a snímací technice, vzniklo mnoho projektů zabývajících se tímto problémem a sledování zraku je využíváno i v praxi. Důvody, proč sledovat oko, byly zpočátku pro samotné pochopení způsobů vnímání prostřednictvím zraku. Další využití je pro výzkum v psychologii, interakce člověka s počítačem, medicínská neurologická vyšetření, návrh rozmístění ovládacích prvků (v kokpitu, v autě, softwaru...) a v neposlední řadě průzkumy pro reklamní průmysl.

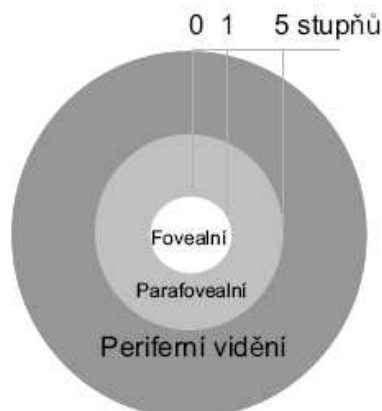
1.1 Oko jako kamera

Lidské oko stojí na začátku řetězce obrazového vnímání člověka. Analogií oka ve snímací technice je kamera. Jak je psáno v [1], oko má objektiv tvořený dvěma členy – rohovku (cornea) a čočku (lens). Funkci clony, řídící množství světla prostupujícího do oka, zastupuje duhovka (iris). Otvoru duhovky říkáme zornice (pupil). Světlo pak prochází průhledným sklivcem až na sítnici (retina), na níž jsou rozmístěny světločivé orgány (tyčinky a čípky). Analogií sítnice ve snímací technice může být CCD snímač nebo film. Na sítnici se nachází místo zvané žlutá skvrna (fovea). Jedná se o místo s nejhustším rozmístěním světločivých orgánů (konkrétně čípků). Je to místo s největším rozlišením a lidské oko v tomto místě vidí nejostřeji. Jak je vidět z Obr. 1, optická osa oka procházející osou čočky se liší od osy vidění, která prochází středem čočky a žlutou skvrnou. Odchylka obou os může být u každého člověka jiná a metody založené na detekci optické osy vyžadují vlastní kalibraci pro každého člověka.



Obr. 1: řez oka [1]

Oko tedy vidí nejostřeji obraz dopadající přímo na žlutou skvrnu. Vnímání obrazu mimo žlutou skvrnu nazýváme periferním viděním. Periferní vidění má ostrost o 15 – 50% horší, než u foveálního vidění [2].



Obr. 2: rozložení ostrého vidění [2]

Přestože oko vidí ostře pouze v malé části pozorované scény, člověk tento fakt nepostřehne. Je to tím, že oko je v neustálém pohybu, zastavuje se jen na krátký časový okamžik, aby se zase přesunulo jinam. Přesouvání je formou cukání rychlostí přes 500°/s [7] a frekvencí až čtyři skoky za sekundu. Odborně se cukání oka nazývá sakády. K sakadickému pohybu dochází například při čtení nebo při sledování pohybující se scény – například pohyb blízké krajiny z okna jedoucího vlaku. Během tohoto rychlého přesouvání oka je jeho citlivost prakticky nulová. Periferní vidění slouží k detekci potenciálně zajímavých míst v obraze, na které by se oko mělo zaměřit. Při sledování pohybujících se předmětů rozeznáváme tři druhy neúmyslných pohybů – chvění, pomalý posun a kmitání [3]:

- Chvění – série malých chvění očí o frekvenci 30 - 80Hz.
- Pomalý posun – neúmyslné pohyby, které mají za následek pomalý posun očí. Posun má za následek to, že i když je objekt nepohyblivý, obraz se posouvá přes žlutou skvrnu.
- Kmitající pohyby – reflex způsobuje kmitání oční bulvy, když se obraz posouvá ke kraji jamky (fovea). Obraz je tak znovu zobrazován na žluté skvrně.

Tato práce se zaměřuje na možnost zjišťování směru pohledu očí pozorující statickou scénu a neúmyslné pohyby očí, ke kterým dochází vždy, nejsou snímány a uvažovány. Vzhledem k jejich vysokým rychlostem pohybu a malým výchylkám, by k jejich detekci bylo třeba vysokorychlostní kamery, která nebyla k dispozici. V kapitole 2 je uveden přehled problematiky sledování směru pohledu, na jehož základě byla pro realizaci vybrána metoda přímého určování 3D směru pohledu. Od kapitoly 3 se zabývám touto metodou, resp. její variantou pro měřicí zařízení tvořeným jedinou kamerou a třemi zdroji světla.

2 METODY SLEDOVÁNÍ ZRAKU

Vzhledem k technologickému pokroku jsou zařízení pro sledování směru pohledu šetrnější k uživateli než kdysi (viz. Obr. 3). Senzory se zmenšují a jejich přesnost roste. Přesto však nejsme schopni vyrobit ideální snímací zařízení. Od ideálního zařízení bychom očekávali následující vlastnosti:

- Neomezovat uživatele ve výhledu a pohybu tváře a hlavy
- Zcela bezkontaktní měření
- Přesnost alespoň jedno procento nebo jednotky úhlových minut
- Rozsah měření polohy oka od jedné úhlové minuty do 45° a rozsah měření rychlosti od jedné do 800 úhlových minut za sekundu
- Real-time odezvu
- Umožnit binokulární snímání
- Přenositelnost vůči měřeným osobám.



Obr. 3: Náhlavní systém Ivana Sutherlanda, Harvard University, 1967 (vlevo) a příklad přenositelného zařízení (www.eye-square.com) (vpravo). Zdroj [4]

Mezi způsoby sledování zraku lze zařadit mechanické metody, elektrostatické metody nebo metody využívající optického sledování oka. Optické metody lze rozdělit na náhlavní a bezkontaktní. Následující podkapitoly uvádí přehled používaných metod spolu s příklady konkrétních realizací.

2.1.1 Mechanické snímání

Mechanické metody se používaly v samých začátcích a pro uživatele nebyly příjemné. Zprvu mezi ně patřilo přímé mechanické spojení oka a záznamového zařízení. Mezi

průkopníky patřil Delabarre, který si na oko upevnil plošku s vláknem spojené s táhlem zaznamenávající horizontální pohyby oka na zakouřené sklíčko (rok 1898).

V šedesátých letech dvacátého století přišla renesance Delabarreovy metody. Přípravek se připevňoval přísátím k oku atmosférickým nebo osmotickým tlakem (podtlakem). Yarbus upevnil v roce 1965 na oko malou chlopeň vysátím vzduchu v jejich mezeře. Fender v roce 1964 používal hydrogenuhličitan sodný (jedlá sůl), který způsobuje změny osmotického tlaku v tkáni oka a je tak schopný vyvolat podtlak mezi okem a kontaktní čočkou a tím ji zafixovat. Na chlopeň či kontaktní čočku bylo upevněno zrcátko a byla sledována dráha odraženého světla daleko lépe než při pozorování odlesku rohovky. Kromě optického sledování polohy kontaktní čočky se využívalo také magnetického snímání, kdy byly na čočce upevněny dvě ortogonální cívky způsobující změny v magnetickém poli, které se vyhodnocovaly.

Nicméně měření bylo pro zkoumané osoby i přes bezdotykové zaznamenávání velice nepříjemné, a přestože byla měření velmi přesná, dále se těmito metodami testovalo pouze na zvířatech.

2.1.2 Elektrostatické snímání

Cit. [3]: Oční pohyby mohou být nahrány jako elektrookulogram (EOG), nahráváním napěťových změn, které nastávají při změně polohy oka. Elektrody měří potenciálové změny při pohybu rohovky blíže nebo dále od snímacích elektrod. Když se oko dívá přímo dopředu, je vzdálenost od obou elektrod stejná, takže i signál je v podstatě nulový. Jestliže je rohovka blíže kladné elektrodě, elektroda zaznamená kladný rozdíl napětí. Elektrookulografické metody nejsou příliš přesné, ale využívají se například pro řízení elektrických vozíků pro tělesně postižené.

Obměnu EOG, kdy jsou elektrody umístěny v uších namísto umístění okolo očí, předvedla firma NNT Docomo. Toto řešení je pro uživatele podstatně přirozenější, než nalepování elektrod na obličej.

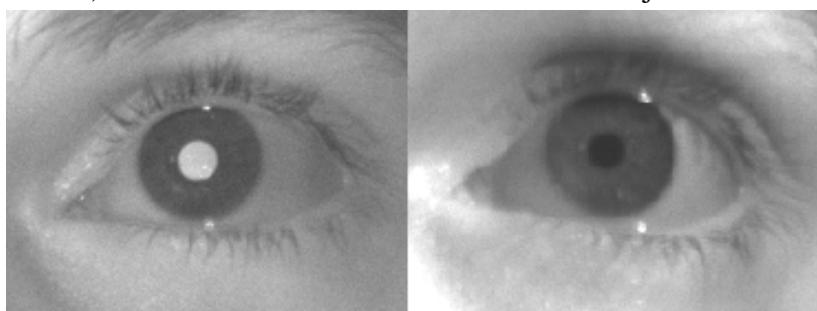


Obr. 4: Snímací sluchátka firmy NNT Docomo [8]

2.1.3 Optické snímání

Další pokrok nastal při použití televizní techniky. Při metodě jsou elektronicky detekovány významné rysy oka. Metody jsou závislé na kvalitě snímání a zpracování signálu. Jsou většinou založeny na detekci hrany přechodu duhovky a sklivce nebo na detekci zorničky.

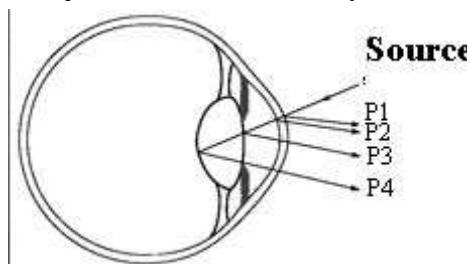
Pro spolehlivou detekci je požadován dostatečný kontrast nasnímaného obrázku. Při detekci duhovky většinou není problém s kontrastem, ale duhovka je často zakrytá víčkem oka, což ztěžuje měření pohybu ve vertikálním směru. Kontrast mezi černou zorničkou a tmavě zbarvenou duhovkou je často malý. Lze si však pomoci vhodným nasvícením oka. Svítí-li zdroj světla rovnoběžně s optickou osou kamery, světlo se odráží od zadní stěny oka (sítnice) zpět do kamery, což způsobí rozsvícení zorničky (bright pupil effect). Rozdíl mezi světlou a tmavou zorničkou je znázorněn na Obr. 5.



Obr. 5: Zornička - vlevo světlá, vpravo tmavá

Stejný princip způsobuje tzv. efekt červených očí, který je patrný při fotografování s bleskem. Takto osvětlená zornička se pak velmi lehce detekuje například prostým prahováním.

Mnohé dnes používané metody využívají pro detekci směru pohledu odlesky světla v oku. Při dopadu paprsku světla na oko se část světla odráží zpět a lze tak pozorovat odlesky nazvané po českém anatomovi Janu Evangelistu Purkyňovi (angl.: Purkinje images). Jak ukazuje Obr. 6, odlesky vznikají odrazem na rozhraní vzduch-rohovka (P1), rohovka-první oční komora (P2) a na rozhraní první komora-čočka (P3), čočka-sklivec (P4). Metody založené na detekci Purkyňových odrazů využívají nejčastěji odlesky P1 (nebo P2) a P3. P4 je většinou těžké zachytit.



Obr. 6: Purkyňovy obrazy [4]

Některé navržené metody vyžadují pevnou fixaci hlavy při snímání (například oporou brady a čela), jiné detekují pozici hlavy automaticky. Rychlost snímání stávajících systémů začíná od 30Hz. Tato frekvence je dostačující pro snímání pomalých očních pohybů. Pro snímání rychlých pohybů (kmitání a chvění) je třeba rychlejšího snímání 240Hz, 350Hz nebo dokonce 1250Hz.

Optické snímání může být řešeno různými počty kamer a zdrojů světla. Obecně však lze rozdělit metody na náhlavní a bezkontaktní systémy a na systémy využívající přirozeného okolního světla a na systémy s umělým infračerveným přisvícením.

2.2 Náhlavní systémy

Vývojem systémů pro sledování, kam se oko dívá, se zabývá skupina Donghenga Li na univerzitě v Iowě [15]. Jejich řešení zahrnuje dvě kamery s rozlišením 640x480 pixelů s frekvencí snímání 30Hz upevněné na ochranných brýlích. Jedna kamera snímá oko a druhá scénu před uživatelem. Snímání oka probíhá v infračerveném spektru pro jasnější přechod mezi zorničkou a duhovkou (limbus). Odlesky od rohovky nejsou využívány. Směr se odvozuje pouze od eliptického tvaru zorničky.



Obr. 7: Náhlavní „nízkonákladový“ systém (D. Li [15])

V [15] je také popsán algoritmus pro hledání zorničky v obraze, využitelný nejen pro náhlavní systémy.

Na ČVUT v Praze byl vyvinut náhlavní systém pro tělesně postižené s názvem I4Contol umožňující ovládání počítače pohybem oka [16]. Využívá jediné kamery upevněné na brýlové obrubě. Pro použití za všech světelných podmínek je scéna přisvětlována IR LED diodou. Přístroj nedovede určovat polohu kurzoru z přímého zadívání se na konkrétní bod na obrazovce. Poloha kurzoru je odvozována inkrementálně.



Obr. 8: systém I4Control [16]

Mezi náhlavní systémy lze dále zařadit helmové zaměřovací systémy pro piloty stíhacích letounů. Jsou založeny na detekci natočení hlavy (helmy) vůči cíli. Pilot je nucen natočit hlavu směrem na cíl. Měření je založeno na detekci změny magnetického pole uvnitř kokpitu. Jak se píše v článku [17], přímá detekce směru, kam se oko dívá, je mnohem náročnější úkol a poskytuje zatím menší přesnost než měření magnetického pole. Proto nebyla pro tento účel použita.



Obr. 9: helma JHMCS firmy VSI (zdroj [18])

2.3 Bezkontaktní systémy

Bezkontaktní metody snímání, kdy je oko (oči), případně celý obličej snímán jednou či více kamerami, lze rozdělit na 2D mapovací techniky a na 3D snímací metody [5].

2.3.1 2D mapovací techniky

Jsou založeny na přímém mapování souřadnic pohledu z 2D obrazu oka. V obrazu jsou detekovány příznaky (např. duhovka, zornička, odlesk) a z jejich polohy jsou odvozeny souřadnice bodu, na který se oko dívá. Tuto závislost lze chápat jako funkci přiřazující množině příznaků souřadnice pohledu. Funkce se zjišťuje při kalibraci a je velmi závislá na poloze hlavy.

Metoda detekce středu zorničky a odrazu světla od rohovky (pupil center cornea reflection technique – PCCR) je často používanou 2D metodou. Pozice místa, kam se oko dívá (směr osy vidění oka) se určuje na základě údajů o středu zorničky a polohy odlesku světla, jímž je oko osvětlováno. Často je využito osvětlení pro vytvoření světlé zorničky. Hlavní nevýhodou systému PCCR je to, že uživatel musí před každým použitím provádět kalibraci přístroje a že je omezen v pohybu hlavy. Jak je psáno v [5], komerční produkty na trhu užívající PCCR často uvádějí, jejich nezávislost na pohybu hlavy, ale z podstaty metody to není možné. Snímat polohu hlavy by bylo možné například přidáním magnetickými čidly, ale toto řešení přináší nezměrné navýšení nákladů.

2.3.2 Přímé zjišťování 3D směru pohledu

Jak už pojmenování těchto metod napovídá, jedná se o praktiky, kdy je přímo zjišťována 3D orientace směru pohledu. Metody zjišťují polohu optické osy a osa vidění se určuje až druhotně z hodnot získaných z kalibrace. Protože optická osa oka prochází vždy středem zorničky a například středem křivosti rohovky (Obr. 12), je naprostá většina metod založena na zjištění polohy středu křivosti rohovky a polohy středu zorničky. Jednotlivé metody jsou rozdílné ve způsobu, jakým tyto body určují. Z hardwarového hlediska se metody liší většinou pouze počtem a konfigurací kamer a světél. Jako zdroje světla se používají téměř výhradně infračervené LED diody (IR LED).

Literatura [5] uvádí přehled možných realizací takovýchto systémů:

Morimoto a kol. [12] (2002) prosazoval myšlenku určení směru pohledu za pomoci jediné kamery a nejméně dvou zdrojů světla. Nejprve se pro každou osobu určí zakřivení rohovky pomocí nejméně tří zdrojů světla. Byly sestaveny polynomické rovnice vyšších řádů, pro určení poloměru a středu křivosti rohovky, ale jejich řešení

nebylo jednoznačné. Jak určit správné řešení ze sady možných je stále otázkou bádání, ale doposud nebyl uveden žádný funkční systém využívající tuto myšlenku.

Ohno a kol. [11] (2004) uvedl aproximační metodu k získání směru pohledu. Metoda vychází z několika zjednodušujících předpokladů, které ji omezují. První z nich je předpoklad, že poloměr křivosti rohovky a vzdálenost zorničky od středu křivosti rohovky je stejná pro všechny uživatele, ve skutečnosti se ale mohou velmi lišit. Dále se předpokládá, že zdánlivý obraz IR LED se vytváří na povrchu rohovky, ve skutečnosti ale leží až uvnitř rohovky. Pro všechna uvedená zjednodušení je přesnost vypočteného středu rohovky velmi malá.

Beymer a kol.[8] (2003) představil jiný systém založený na složitém 3D modelu oka, zahrnujícím nejméně sedm parametrů. Nejprve se individuálně přizpůsobí 3D model pro každého nového uživatele a to z charakteristických rysů fotografovaného oka. Pro sestavení modelu jsou použité pouze odlesky IR LED a hrany zorničky. Jak už ale bylo napsáno, odlesky jsou ve skutečnosti zobrazení neskutečného obrazu zdroje světla, vznikajícího uvnitř rohovky. Také hrany zorničky neleží na povrchu rohovky, ale uvnitř. Proto zjišťování poloměru rohovky pomocí uvedené metody není možné a také sestavování tak složitého modelu za pomoci tak malého počtu příznaků bude velmi nestabilní a citlivé na šum.

Shin a kol. [10] (2004) přišel s novou metodou, jak určit 3D směr pohledu a to za pomoci více kamer a zdrojů světla. Jejich metoda však nepočítá s rozdíly, které jsou mezi očima různých lidí. Také jsou zde omezující podmínky vycházející ze stereo kamer. Konkrétně, jestliže se uživatel dívá na spojnici optických středů kamer, směr pohledu nemůže být určen jednoznačně.

První systém využívající jedné kamery (Morimoto) určoval směr s přesností okolo 3 stupňů. První přesnější systém s jedinou kamerou představila firma Tobii Technology (přesnost 0.5 až 1 stupeň). Jejich řešení ale nebylo z komerčních důvodů blíže popsáno. Později vzniklo několik podobných projektů také na akademické půdě. Příkladem může být práce Guestrina [13] nebo Meyera [14].



Obr. 10: vlevo Meyerův systém, vpravo komerční Tobii systém

Meyerův systém zahrnuje kameru s vysokým rozlišením (1280x1024) a dva zdroje IR světla. IR osvětlení slouží jednak k nasvícení scény a snadnější detekci oka a také k určení středu a poloměru křivosti rohovky. Tobii využívá třech zdrojů světla.

Pro vlastní realizaci byla zvolena právě jedna z variant metody přímého zjišťování směru pohledu a podrobnější popis této problematiky je uveden v následujících kapitolách.

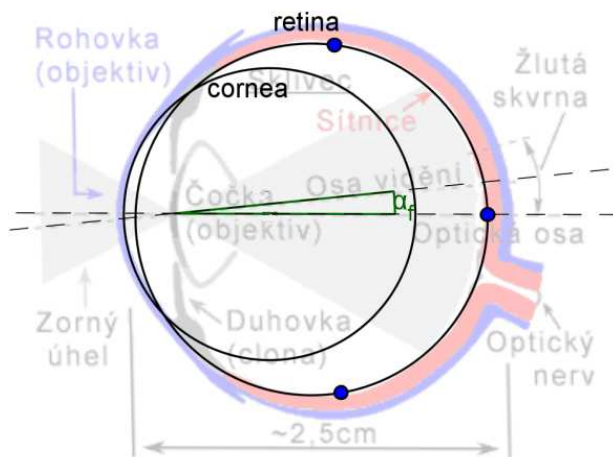
3 PŘÍMÉ ZJIŠŤOVÁNÍ 3D SMĚRU POHLEDU

Pro vlastní realizaci byla zvolena metoda přímého zjišťování prostorového směru pohledu. Její výhodou je, že umožňuje určení nejenom místa pohledu, ale určuje polohu samotného oka a vektor jeho natočení. Toho lze využít například pro určování vzdálenosti bodu, kam se člověk dívá - při detekci obou očí. Dalším podstatným důvodem pro výběr metody bylo, že je možné použít jedinou kameru pro snímání obou očí a není tedy potřeba pořizovat drahé vybavení. Jednou kamerou lze také teoreticky sledovat více osob najednou.

3.1 Model oka a rozbor metody

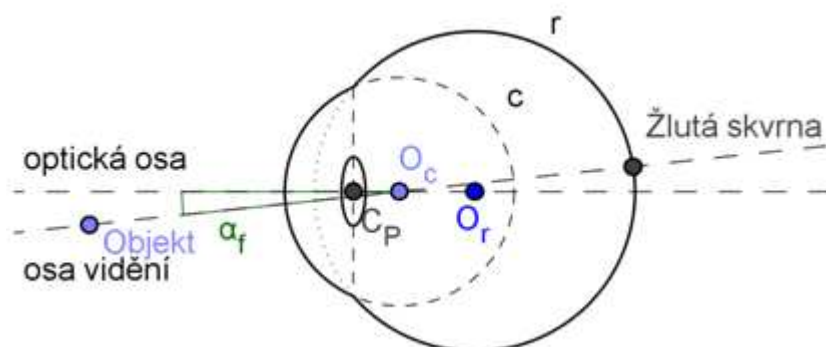
Pro odvození polohy optické osy se vychází z pozice středu křivosti rohovky O_C a z pozice středu zorničky C_P . Tyto body jsou určovány z odlesků světla v oku a z polohy obrazu středu zorničky. Podrobný postup jejich výpočtu je uveden v kapitole 5.

Pro sestavení algoritmů, které budou počítat natočení a směr pohledu oka, je nutné zvolit správný model oka. Jako dostatečná aproximace se jeví sjednocení dvou koulí, které představují oční bulvu a rohovku (Obr. 11).



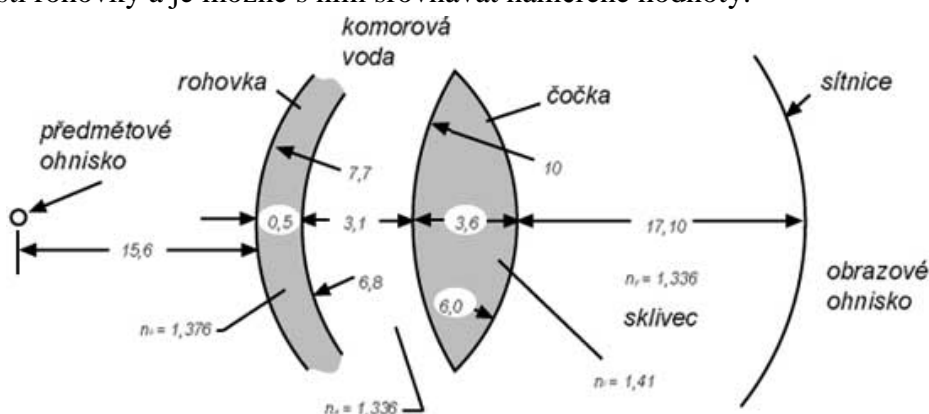
Obr. 11: Model a řez oka

Optická osa prochází body P_C a O_r . Osa vidění prochází středem křivosti rohovky O_C a žlutou skvrnou. Obě osy spolu svírají úhel α_f , který se může pro každého uživatele lišit a určuje se při kalibraci.



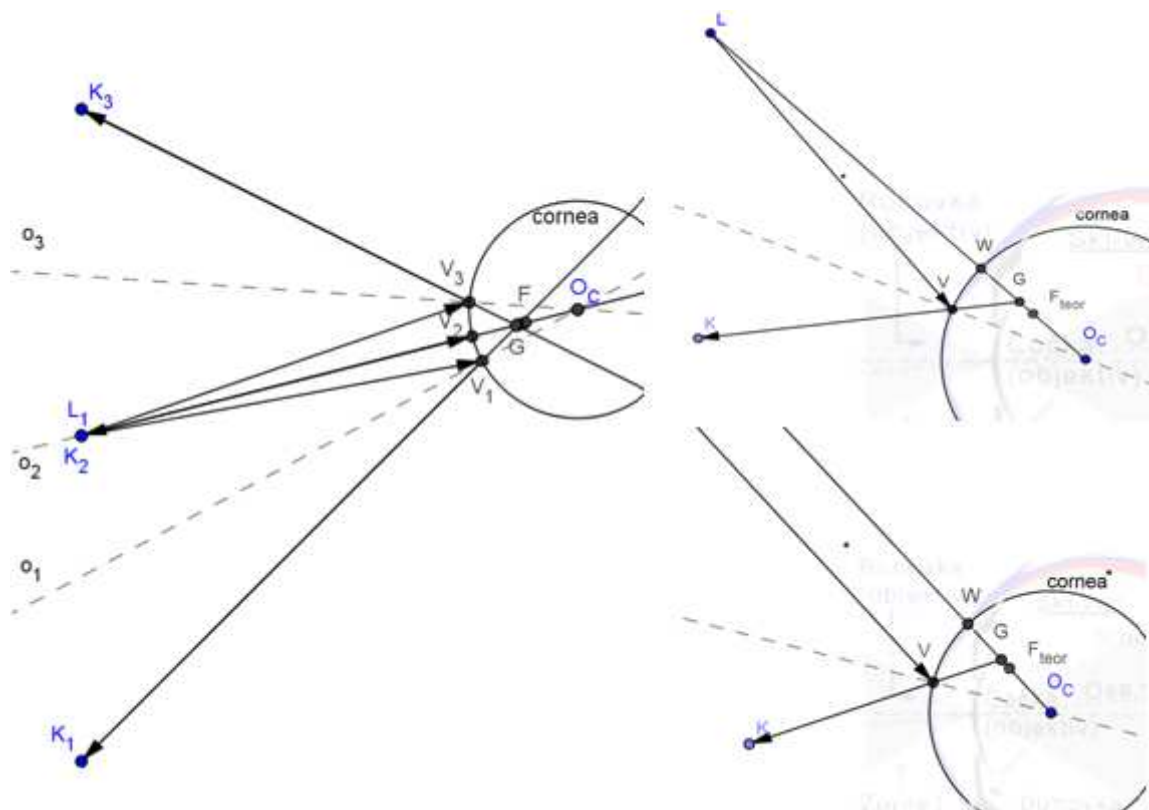
Obr. 12: Model oka – C_P je střed zorničky, O_C je střed křivosti rohovky, O_r je střed křivosti sítnice (nebo také bulvy).

Velice podrobný model oka spolu s informacemi o parametrech optického systému nabízí Gullstrandův model oka. Z tohoto modelu je možné odvodit například poloměr křivosti rohovky a je možné s ním srovnávat naměřené hodnoty.



Obr. 13: Schematické Gullstrandovo oko s hodnotami optického systému [22]

Na rohovku se lze dívat jako na kulové zrcadlo. Platí pro ni stejné zákony a my tak můžeme odvodit, jak se v ní budou zdroje světla odrážet do kamery. Na Obr. 14 je zobrazen případ s jedním zdrojem světla L_1 a třemi kamerami K_1 , K_2 a K_3 . Je znázorněna konstrukce virtuálního obrazu bodu L_1 . Virtuální obraz – odlesk G – vzniká na průsečíku význačných paprsků odražených od kulové plochy (paprsek LO_C a VK).



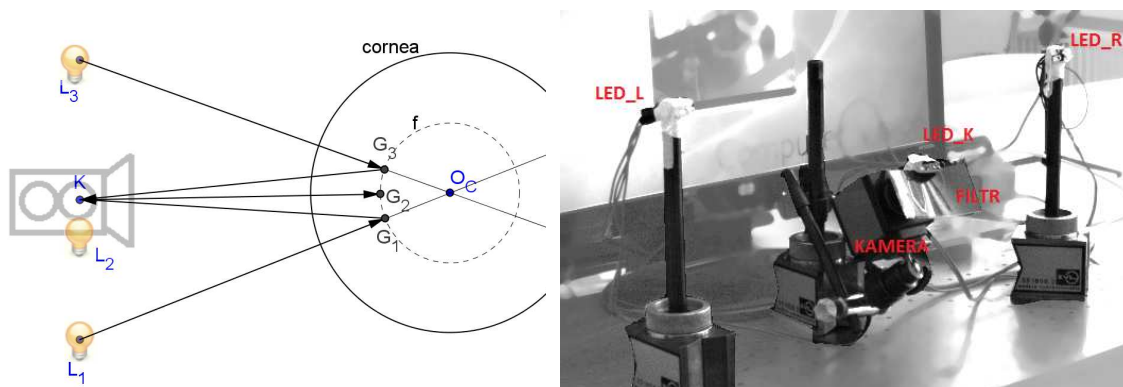
Obr. 14: Konstrukce virtuálního obrazu

Pro dostatečně vzdálený světelný zdroj L lze považovat paprsky LV a LW za rovnoběžné. Potom platí, že velikost úhlu VO_CG je rovna velikosti úhlu dopadu a že je tedy také trojúhelník VO_CG rovnoramenný. Pro úhly dopadu do 30° se velikost ramen O_CG a VG blíží polovině vzdálenosti O_CW , tedy polovině poloměru křivosti rohovky. Lze potom tvrdit, že kamery vidí tentýž virtuální obraz G zdroje světla L_1 a že tento virtuální obraz G se tvoří v blízkosti ohniska F . Při použití alespoň dvou kamer, by bylo možné triangulační metodou určit polohu virtuálního obrazu (ohniska).

Postupovat lze také opačně, kdy použijeme tři zdroje světla a jedinou kameru. Potom máme na fotografii oka hned tři odlesky a při znalosti poloměru křivosti rohovky R_C jsme schopni určit vzdálenost a následně také polohu středu křivosti rohovky O_C . Ze znalosti polohy alespoň dvou zdrojů světla a jejich obrazů, je možné určit O_C . Tento způsob je použit v praktické části a je v dalších kapitolách rozebírán.

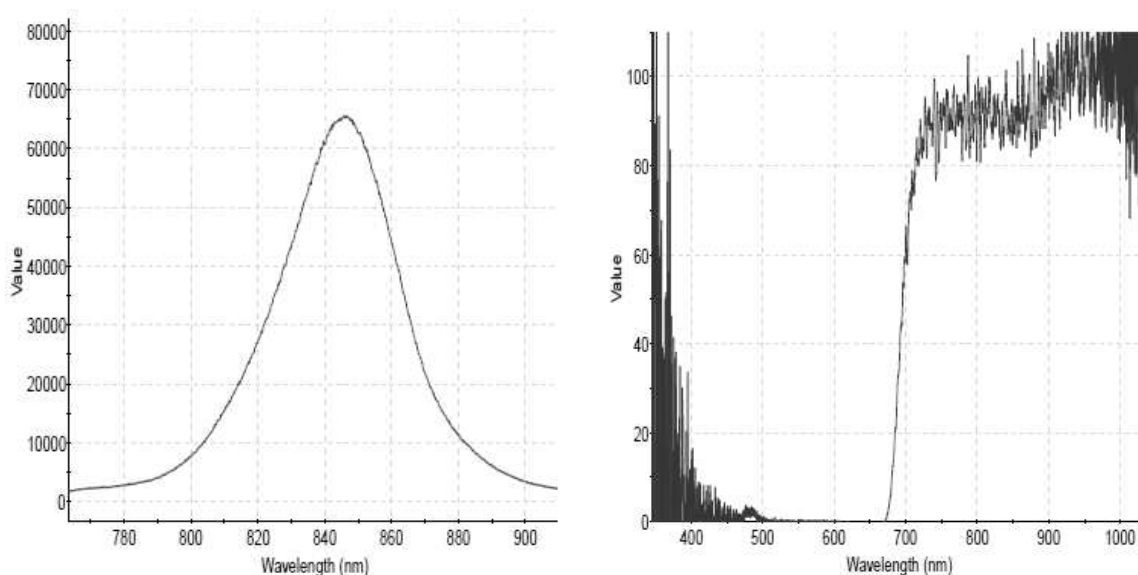
3.2 Konfigurace měřicí sestavy

Vlastní měřicí sestavu tvoří soustava kamery a tří zdrojů světla. Schematické znázornění je uvedeno na Obr. 15.



Obr. 15: Měřicí sestava

Aby osvětlení scény nerušilo uživatele, jsou oči snímány v IR spektru. Je použito IR LED diod o vlnové délce 850 nm. Kamera musí být tedy schopná snímat i v blízkém IR spektru. To splňují zpravidla pouze černobílé kamery, protože barevné kamery jsou vybaveny filtrem pro odstranění IR světla, aby neovlivňovalo barevné kanály. Ve vlastní aplikaci je naopak vhodné filtrovat viditelné spektrum pro odstranění nežádoucích odlesků okolí. Filtr je poskládán ze dvou foliových filtrů. Spektrální charakteristiky použitých LED diod a složeného filtru jsou na obrázku Obr. 16. Filtr propouští přibližně 90 % IR světla a viditelné světlo prakticky nepropouští.



Obr. 16: Spektrální charakteristiky

Pro snímání oka byly testovány dvě kamery. První kamera firmy KOBİ SG-39MVR-1E s rozlišením 768x576 bodů v kombinaci s Video-to-USB konvertorem firmy ImagingSource byla později nahrazena kamerou Imaging Source DMK 21BF04 (640x480 bodů).

Ukázalo se, že na kvalitu snímání světlé zorničky má rozhodující vliv míra okolního osvětlení, paralelnost osvětlení s optickou osou kamery a expozice snímku. U kamery

KOBI nebylo možné nastavit pevnou dobu expozice a její IR osvětlení nebylo umístěno dostatečně blízko optické ose.

3.3 Kalibrace kamery

Aby bylo možné přesně určovat pozice bodů z kamery, je nutné identifikovat ohniska kamery a odstranit zkreslení způsobené nedokonalostí objektivu. Pro účely kalibrace je použito funkcí knihovny OpenCV. Knihovna umožňuje nalézt vnitřní parametry kamery (ohniska v ose x a ose y, střed optické osy) a parametry zkreslení pomocí sady snímků šachovnice. Dále je možné získat polohu každé nasnímané šachovnice vůči ohnisku kamery v jejích souřadnicích (translační vektor a rotační matici).

Funkce OpenCV jsou založeny na modelu pinholové kamery. Obraz kamery je projekcí scény pomocí perspektivní transformace. Pro transformaci platí následující vztahy.

$$s \cdot m' = A \cdot [R | t] \cdot M' \quad (1)$$

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ve vztazích je značeno: (X,Y,Z) souřadnice 3D bodu, (u, v) souřadnice v projekční rovině, A projekční matice, (c_x,c_y) střed optické osy, f_x a f_y ohniskové vzdálenosti v pixelech. [R|t] je matice rotace a translace (matice vnějších parametrů kamery). Tato matice slouží k popisu polohy objektu vůči statické kameře, nebo naopak polohy kamery vůči statické scéně. Transformaci lze zapsat také takto:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= R \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t, \quad z \neq 0 \\ x' &= x / z \\ y' &= y / z \\ u &= f_x \cdot x' + c_x \\ v &= f_y \cdot y' + c_y \end{aligned} \quad (3)$$

Bod [x', y'] je 3D bod [x, y, z] promítnutý do roviny v jednotkové vzdálenosti.

Na Moskevské univerzitě využili funkcí OpenCV a vytvořili program *GML Camera Calibration toolbox* [20], který pomůže spočítat vnitřní parametry kamery i parametry zkreslení objektivu. Zkreslení je popsáno v literatuře [23]. Zkreslení, které se u objektivů vyskytuje lze dostatečně přesně popsat radiálním a tangenciálním zkreslením. Radiální zkreslení roste se vzdáleností od optického středu, kde je nulové. V praxi je

zkreslení malé a lze jej aproximovat pouze prvními dvěma členy Taylorova polynomu k_1 a k_2 . V případě většího zkreslení, například u objektivu typu rybí oko, lze rovnice rozšířit ještě o další člen Taylorova polynomu. Radiální zkreslení popisuje rovnice (4) a platí pro souřadnice v rovině v jednotkové vzdálenosti od kamery. V rovnici jsou označeny k_1, k_2, k_3 parametry radiálního zkreslení, r poloměr zkreslení – vzdálenost bodu od středu optické osy, $[x, y]$ normovaná souřadnice nezkresleného bodu a $[x_d, y_d]$ normovaná souřadnice zkresleného bodu. Normalizace se provádí podle vztahů (5) a je nutná k převedení souřadnic z roviny snímáče do jednotkové roviny (podobně jako v (3)).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \\ u_d &= f_x \cdot x_d + c_x & u &= f_x \cdot x + c_x \\ v_d &= f_x \cdot y_d + c_y & v &= f_x \cdot y + c_y \end{aligned} \quad (5)$$

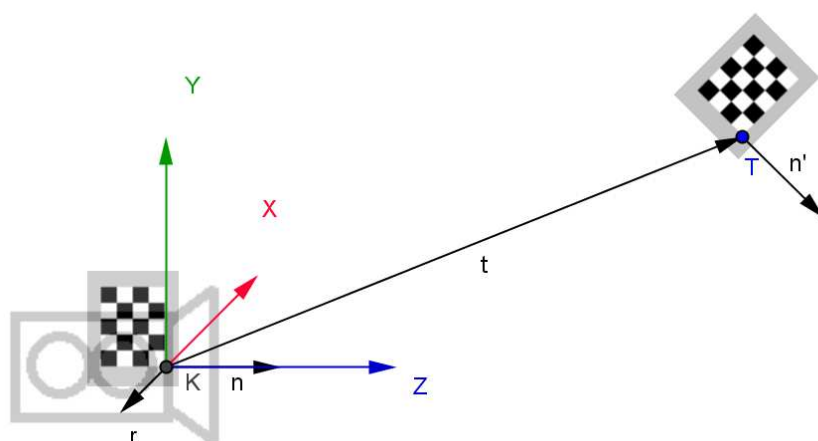
Byly sestaveny kalibrační sady snímků šachovnice pro používané kamery. Nalezené parametry jsou silně závislé na způsobu nasnímání kalibrační sady. Doporučení k vytvoření kalibrační sady je popsáno na stránkách [20] nebo v nápovědě programu *GML Camera Calibration toolbox*. Přes stejný postup při snímání jsou však nalezené parametry závislé na způsobu nasnímání – především na vzdálenosti snímaných šachovnic od kamery. Nalezené vnitřní a vnější parametry kamery jsou shrnuty v Tab. 1. Je vidět, že vnitřní parametry kamery pro různé kalibrační sestavy se liší v rozmezí zhruba do 10%. Parametry zkreslení se liší někdy i o jeden řád. Rozdílné hodnoty jsou způsobeny především tím, že na některých snímcích v kalibrační sestavě nebylo možné najít šachovnici. Snímek byl vlivem řádkování kamery a jejího nedostatečného rozlišení místy neostrý a algoritmus tak snímek vynechal.

Tab. 1

KOBI SG-39MVR-1E					
kalibrační sestava 1: 84 snímků	vnitřní parametry	f_x	f_y	c_x	c_y
		1469,45	1479,08	443,77	425,97
	parametry zkreslení	k_1	k_2	p_1	p_2
		-0,1577	-0,3752	0,0044	-0,0023
kalibrační sestava 2: 120 snímků	vnitřní parametry	f_x	f_y	c_x	c_y
		1337,96	1426,05	340,77	383,69
	parametry zkreslení	k_1	k_2	p_1	p_2
		-0,3249	1,0314	-0,0079	-0,0005
Imaging Source DMK 21BF04					
kalibrační sestava: 50 snímků	vnitřní parametry	f_x	f_y	c_x	c_y
		1476,83	1473,68	386,80	222,36
	parametry zkreslení	k_1	k_2	p_1	p_2
		-0,5902	0,4329	0,0031	-0,0019

3.4 Kalibrace měřicí soustavy

Pro výpočty polohy středu křivosti rohovky oka z odlesků světél je důležité znát polohy světél vůči kameře. Známe-li vnitřní parametry kamery (získané při její kalibraci), jsme schopni určit (s pomocí knihovny OpenCV) rotační vektor \vec{r} a translační vektor \vec{t} , kterým šachovnici umístěnou v počátku v rovině XY souřadnic kamery dostaneme do polohy, která byla sejmuta kamerou. Situaci ukazuje Obr. 17.



Obr. 17: Transformace šachovnice, zjištění polohy v prostoru

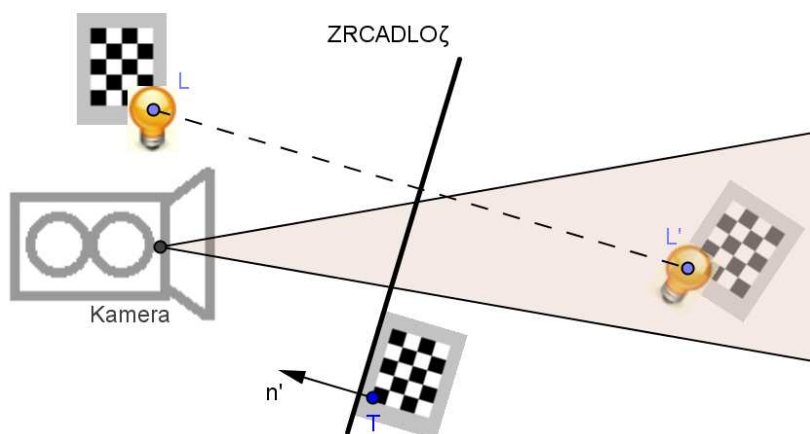
Vektor rotace udává osu v prostoru, kolem které se má rotovat. Úhel θ , o který se má rotovat, vyjadřuje velikost vektoru \vec{r} . Abychom mohli použít transformaci ve tvaru, jak je uvedeno v kapitole 3.3, musí být rotační vektor převeden na rotační matici. To lze provést Rodriguesovou transformací:

$$\theta = |\vec{r}|$$

$$\vec{r}^n = \vec{r} / \theta, \quad \vec{r}^n \dots \text{normalizovaný vektor}$$

$$R = \cos \theta \cdot I + (1 - \cos \theta) \cdot \vec{r}^n \cdot (\vec{r}^n)^T + \sin \theta \cdot \begin{bmatrix} 0 & -r_z^n & r_y^n \\ r_z^n & 0 & -r_x^n \\ -r_y^n & r_x^n & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

V případě, že potřebujeme určit polohu bodu mimo zorné pole kamery, je možné si pomoci zrcadlem, jak ukazuje Obr. 18.



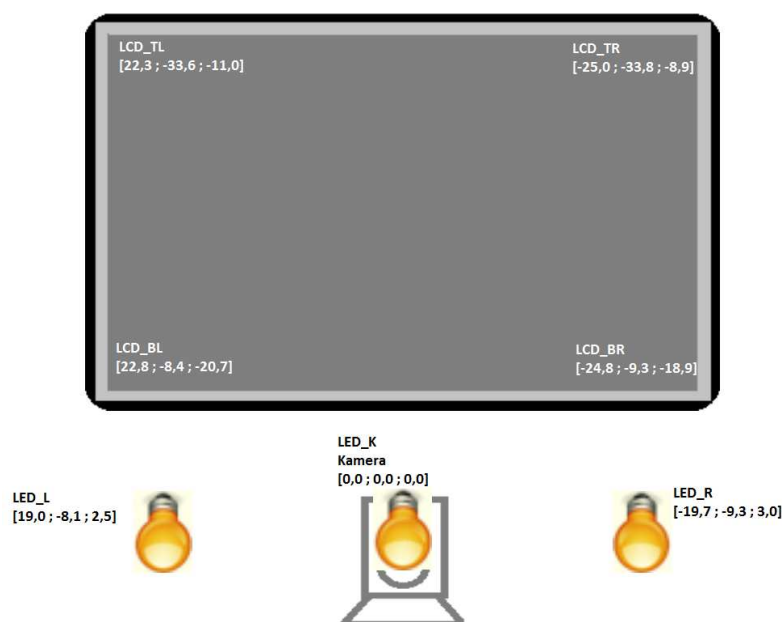
Obr. 18: Kalibrace světla pomocí zrcadla

V zrcadle kamera snímá zdánlivý obraz. Pro výpočet skutečné polohy je nutné vědět polohu zrcadla (plochu ζ), kterou určíme z šachovnice přiložené na zrcadlo. Plocha je definována například normálovým vektorem a bodem v rovině. Normálový vektor zrcadla dostaneme transformováním normálového vektoru šachovnice v ohnisku (Obr. 17). Bod ležící v rovině zrcadla odpovídá translaci, kterou určíme. Skutečnou polohu světla L odvodíme pomocí Obr. 18. Platí vztahy:

$$\begin{aligned}
L &= L' + \vec{n}' \cdot 2|\zeta L'| \\
\vec{n}' &= (a \quad b \quad c) \\
\zeta : \quad ax + by + cz + d &= 0 \\
d &= -(a \cdot T_x + b \cdot T_y + c \cdot T_z) \\
|\zeta L'| &= \frac{|a \cdot L'_x + b \cdot L'_y + c \cdot L'_z + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}
\end{aligned} \tag{7}$$

Samotnou kalibraci provádím se šachovnicí o rozměrech 9x8 polí a velikostí pole 11x10 mm. Rozměry měřicí šachovnice je nutné určit s velkou přesností (desetiny mm), protože díky malým rozměrům šachovnice a určování pomocí odrazu v zrcadle má i malá odchylka velký vliv na celkový výsledek.

Pomocí výše popsanych technik jsou určeny polohy pravé a levé LED diody. Dále je kalibrována poloha monitoru, aby bylo možné určit polohy na něm zobrazovaných bodů v experimentech. Schéma s orientačními polohami diod a LCD je na obrázku

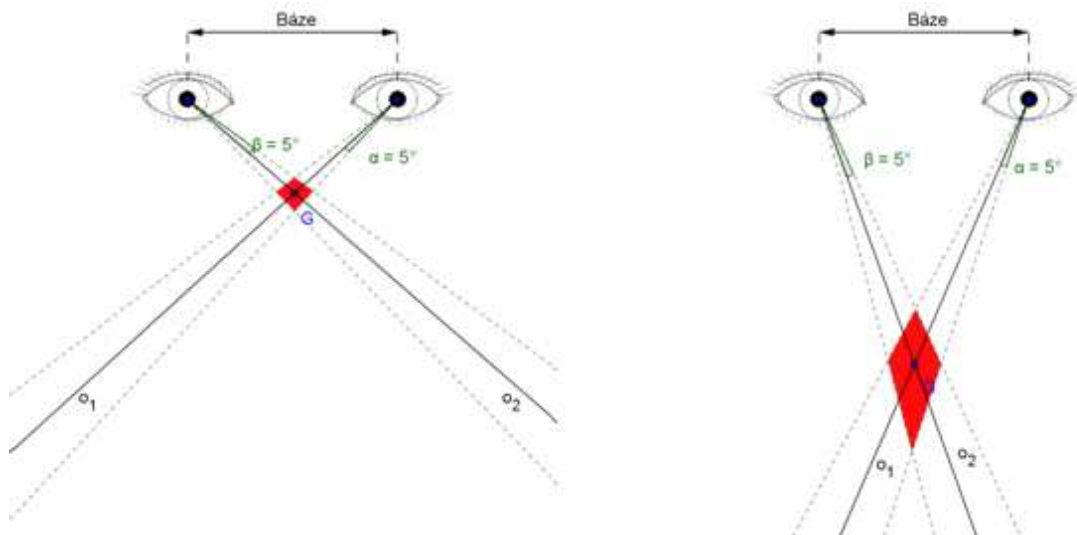


Obr. 19: Rozmístění prvků (souřadnice uvedeny v cm)

3.5 Určení místa pohledu

Ze směru pohledu je praktické určit také místo, kam je pohled namířen. Toto místo lze určit, známe-li nějakou bližší informaci o rozmístění prostoru ve scéně. Typicky je to rovina monitoru nebo rovina projekčního plátna. Místo pohledu pak určíme jako průsečík přímky pohledu (osy vidění) a prostoru scény (rovina monitoru).

Jinou možností je určení místa pohledu v prostoru bez informace o rozložení scény. Vycházíme z toho, že osy vidění obou očí se sbíhají v bodě zájmu. Místo pohledu je tedy určeno jako bod, který má od obou os stejnou, minimální vzdálenost.



Obr. 20: Určení místa pohledu

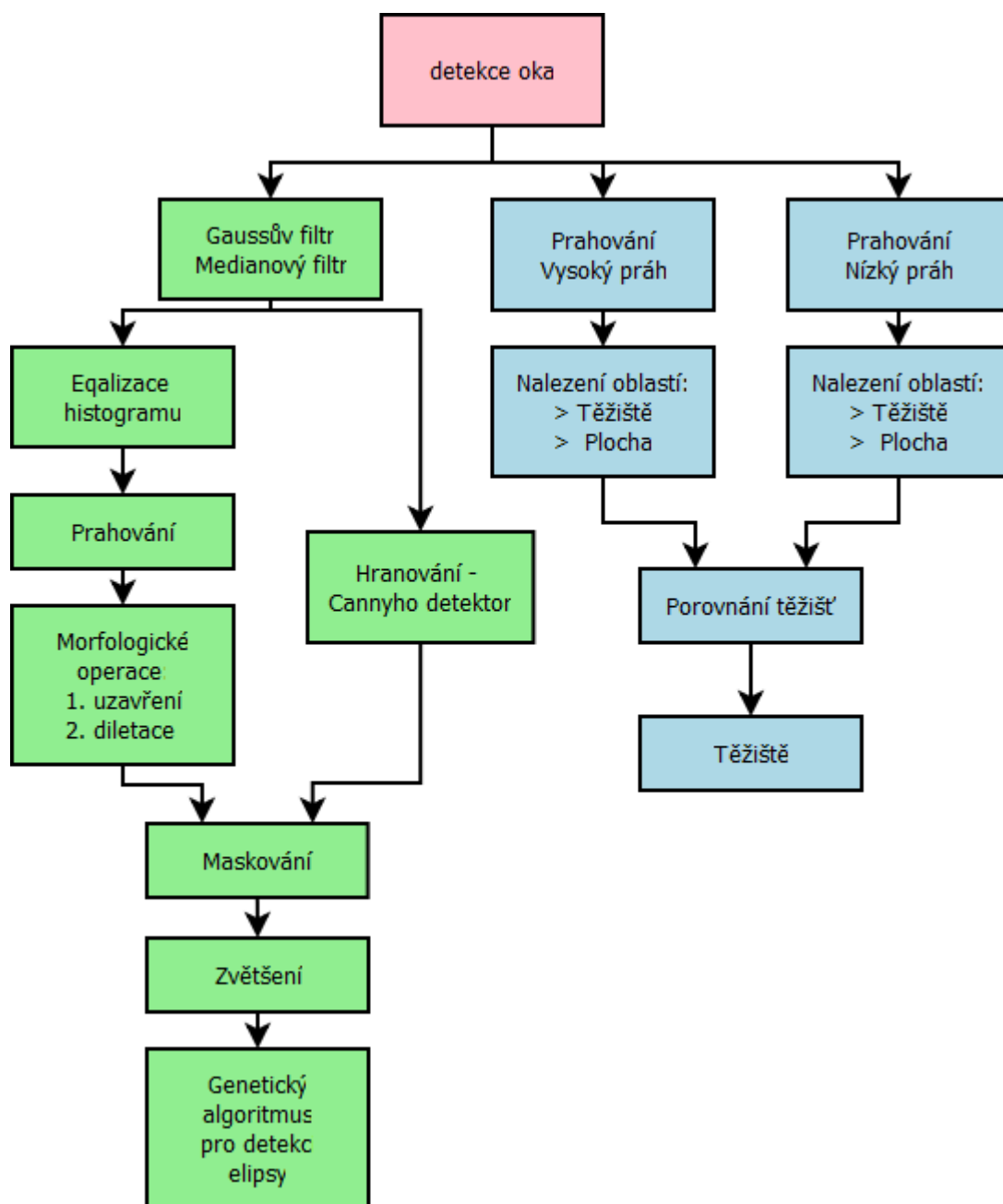
Na Obr. 20 je ukázán rovinný případ určení místa pohledu z os vidění. Měření směru pohledu není nikdy přesné, přerušované čáry v obrázku představují nejistoty určení směru pohledu a vybarvený čtyřúhelník nejistotu určení místa pohledu. Je patrné, že s rostoucí vzdáleností pozorovaného bodu, roste nejistota určení místa pohledu. Díky malé bázi očí, se nejistota zvětšuje především ve směru k pozorovanému objektu. Jeho vzdálenost lze proto určit s menší přesností, než polohu ve zbývajících směrech.

4 ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

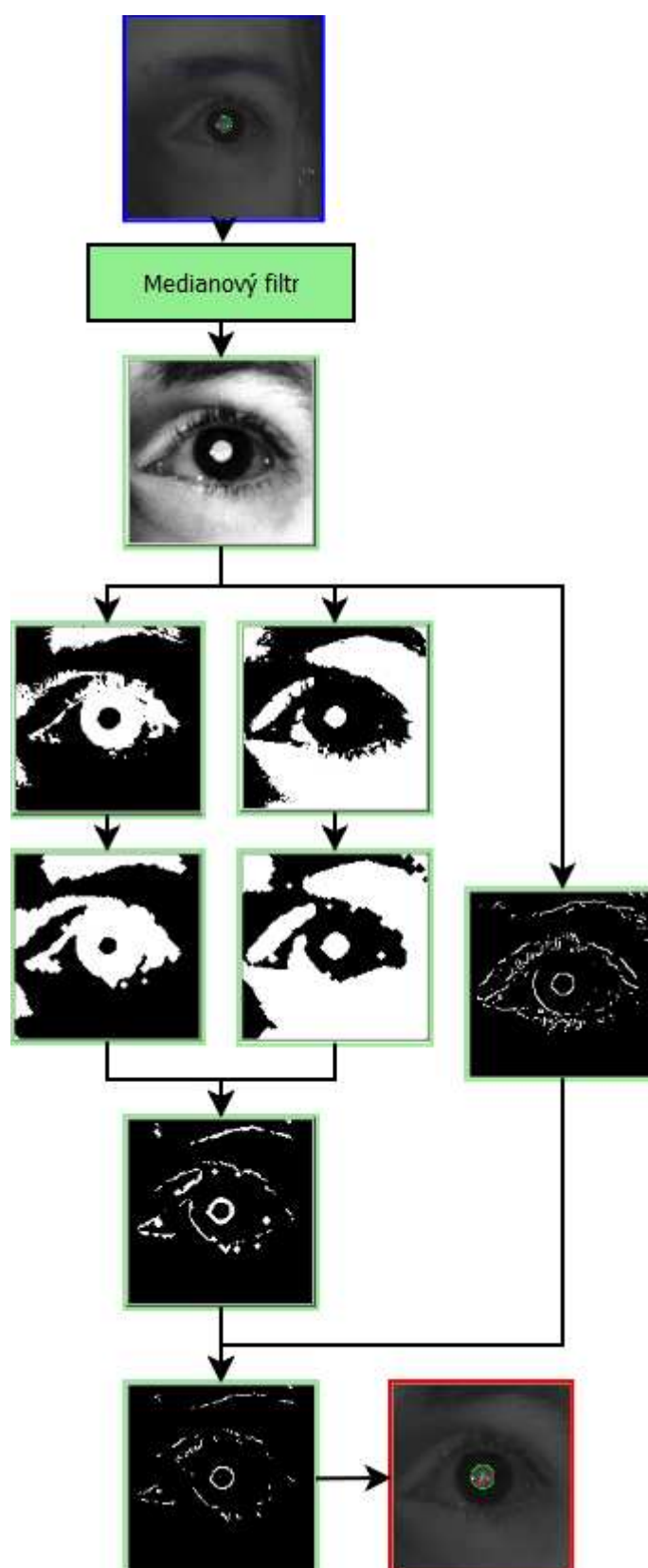
Zpracování obrazu má za úlohu určit z nasnímaného obrazu polohu očí, polohu odlesků diod a polohu středu zorničky. Kamera poskytuje obraz v odstínech šedi, ve kterém jsou pomocí Haarových příznaků hledány polohy očí. Další zpracování již neprobíhá s celým obrazem, ale pouze s jeho oblastmi. Střed zorničky je určen jako střed elipsy, která je hledána v hranové reprezentaci oblasti oka. Hranová reprezentace je vytvořena Cannyho detektorem. Odlesky jsou detekovány na základě porovnání těžišť oblastí, získaných prahováním s odlišným prahem. Na Obr. 21 je zobrazeno schéma předzpracování obrazu. Levá větev naznačuje postup při segmentaci zorničky, pravá větev hledá polohu odlesků.

Infračervený filtr má negativní vliv na množství světla použitelného pro expozici. Je nutné zvýšit zisk z kamery, což má za následek vyšší šum v obraze. Tento šum ovlivňuje především funkci hranového detektoru a je proto nutné jej filtrovat. Byl testován Gaussův filtr, ale ten se ukázal méně vhodný, protože při menší masce nebyla filtrace šumu účinná a pro větší masky dochází k degradaci hran. Jako velmi vhodný se ukázal mediánový filtr (maska 3x3). Díky malé oblasti snímku, na který je aplikován (cca 100x100 bodů), není problém s jeho výpočtovou náročností.

Pro zvýšení kontrastu v obraze před prahováním je aplikována ekvalizace histogramu. Pro redukci množství hran, je detekována oblast přechodu duhovky a zorničky. Zvlášť je prahována tmavá oblast duhovky a světlá oblast zorničky. Tyto oblasti se pomocí morfologických operací uzavrou, aby byly doplněny případné chybějící fragmenty. Dále je provedena dilatace oblastí a jejich binární součin, čímž dostaneme oblast hrany. Získáme tak masku pro odstranění nežádoucích hran z hranové reprezentace. Hranová reprezentace je vypočtena Cannyho detektorem. Názorný postup získání hran zorničky je na Obr. 22.



Obr. 21: Schéma předzpracování obrazu

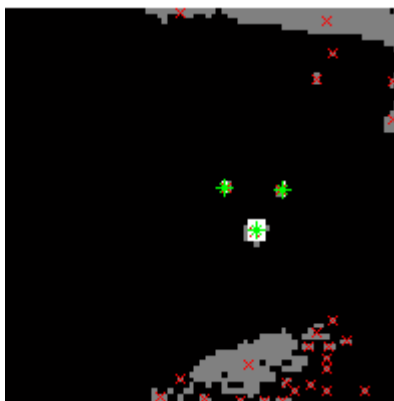


Obr. 22: Segmentace zorničky

Polohy odlesků hledám prahováním. Naprahovaný obrázek je použit jako maska pro následné určení těžiště plochy odlesku. Těžiště T je počítáno přes momenty prvního a nultého řádu m_{pq} (8). Dosahujeme tak mezipixelové přesnosti určení polohy odlesku.

$$m_{pq} = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy, \quad T = \left[\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right] \quad (8)$$

Na obrázku Obr. 23 je zobrazen výsledek prahování s vyšším (bílá oblast) a s nižším (šedá oblast) prahem. Nalezená těžiště oblastí jsou vyznačena hvězdičkou.



Obr. 23: prahování dvěma prahy a nalezená těžiště segmentů

Nalezené polohy odlesků se ještě dále filtrují podle polohy vůči nalezené zorničce. Nastavením prahů spolu s filtrací dle polohy zorničky je dosaženo velké robustnosti při hledání odlesků.

Hranová reprezentace zorničky je popisována jako elipsa. Pro získání popisu byla testována Houghova transformace pro hledání kružnice, proložení lineární regresí a genetický algoritmus. Protože rozlišení obrázku je poměrně malé (oblast oka má rozměry přibližně 100x100 bodů), hranová reprezentace obsahuje poměrně malé množství bodů (kolem 50 bodů) a nedovoluje Houghově transformaci vytvořit dostatečný statistický soubor pro nalezení kružnice.

Pro popis zorničky jako elipsy byl testován také postup, kdy jsou parametry elipsy určovány lineární regresí přeuročené soustavy rovnic sestavené z bodů hranové reprezentace. Tento způsob je velmi rychlý oproti ostatním testovaným algoritmům, ale je velice citlivý na *outliers* v hranové reprezentaci. Obecnou rovnici elipsy lze popsat rovnicí (9). Je potřeba určit pětici parametrů a, b, h, g a f .

$$f : a \cdot x^2 + 2 \cdot h \cdot x \cdot y + b \cdot y^2 + 2 \cdot g \cdot x + 2 \cdot f \cdot y + 1 = 0 \quad (9)$$

Soustavu rovnic lze zapsat maticově podle (10). Matici A a Z sestavujeme podle rovnice (9). Vyřešením maticové rovnice (10) například SVD rozkladem dostaneme vektor parametrů obecné rovnice elipsy P .

$$A \cdot P = Z$$

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & 2x_1y_1 & y_1^2 & 2x_1 & 2y_1 \\ x_2^2 & 2x_2y_2 & y_2^2 & 2x_2 & 2y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & 2x_ny_n & y_n^2 & 2x_n & 2y_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ h \\ b \\ g \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Výsledky, které lineární regrese poskytuje, jsou dostatečné jen pro snímky, kdy hrana zorničky není narušena odleskem světla a kdy je nasvícení oka ideální. Pro popis hran byl pro dosažení větší robustnosti a lepší detekci i méně kvalitních snímků navržen genetický algoritmus, který je popsán v následující kapitole.

4.1 Genetický algoritmus pro hledání elipsy

Při návržení genetického algoritmu jsem vycházel z literatury [20], kde je popsán algoritmus pro hledání elipsy genetickým algoritmem s více populacemi. V práci hledám vždy jedinou elipsu, a tedy nevyužívám mechanismu více populací.

Obecnou rovnici elipsy udává vztah (9). V rovnici je pět neznámých a pro jejich určení je tedy nutné sestavit lineární soustavu rovnic a vyřešit ji. Pro jednoznačné určení elipsy tedy postačí pět bodů.

Jinou možností, jak definovat elipsu než parametry obecné rovnice roviny je pomocí pěti geometrických parametrů: x-ová souřadnice středu, y-ová souřadnice středu, délka hlavní a délka vedlejší poloosy a úhel natočení elipsy.

U genetického algoritmu definujeme operátory:

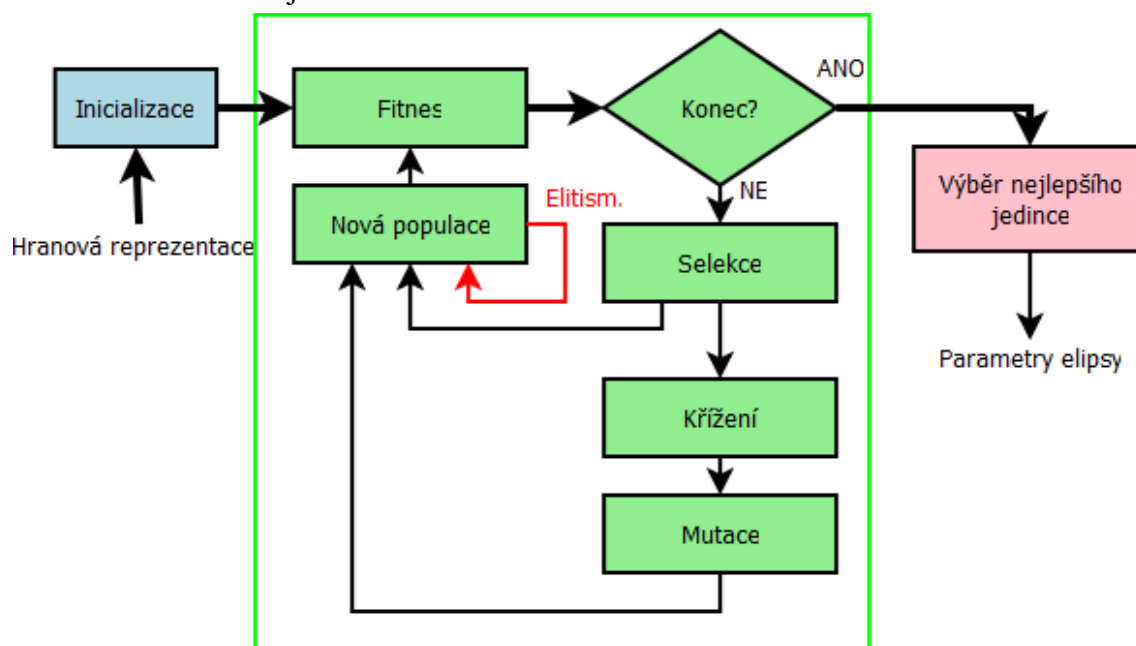
- generování jedince
- hodnotící funkce (fitness funkce)
- selekce
- křížení
- mutace

Operátory pracují s operandy:

- populace
- jedinec
- chromozóm
- gen

Populace je soubor jedinců. Každý jedinec v populaci (elipsa v obrázku) je charakterizován svým chromozómem (jedinec je de facto chromozóm, pouze mluvíme-li o jedinci, máme na mysli všechny jeho vlastnosti, zatímco mluvíme-li o chromozómu, máme na mysli pouze jeho geny). Elipsa je definována pětici bodů a chromozóm je tedy tvořen stejnou pětici bodů. Jednotlivé body v chromozómu označujeme za geny.

Schéma celého genetického algoritmu, jak jednotlivé operace na sebe navazují, je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 24: Genetický algoritmus

4.1.1 Generování jedinců

V prvním kroku je nutné vygenerovat počáteční generaci. Obraz je potřeba převzorkovat a zvětšit. Je to proto, aby měl genetický algoritmus dostatečně veliký vstupní prostor, aby bylo možné vygenerovat bohatší genový fond počáteční generace. To se může dít náhodně, ale protože ne každá pětice bodů definuje elipsu, je prováděna kontrola invariantů kuželosečky.

Jak je uvedeno v [24] nebo v [25], obecná rovnice kuželosečky je popsána vztahem (11).

$$a_{11} \cdot x^2 + 2 \cdot a_{12} \cdot x \cdot y + a_{22} \cdot y^2 + 2 \cdot a_{13} \cdot x + 2 \cdot a_{23} \cdot y + a_{33} = 0 \quad (11)$$

Při transformaci souřadnic x a y se nemění některé charakteristické veličiny rovnice (11). Těmto veličinám říkáme invarianty a lze podle nich charakterizovat typ kuželosečky. Jsou definovány invarianty: determinant kuželosečky Δ a determinant kvadratických členů δ :

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \quad (12)$$

$$\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad (13)$$

Pro reálnou elipsu pak musí platit $\Delta > 0$ a $\delta > 0$. Parametry elipsy lze vypočítat podle vztahů:

- Střed

$$S = \left[\frac{-a_{13}}{a_{11}}, \frac{-a_{23}}{a_{22}} \right] \quad (14)$$

- Úhel natočení

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}} \quad (15)$$

- Pro rovnost $a_{11} = a_{22}$ je možné volit $\varphi = \pi / 4$. Mezi původními souřadnicemi x, y a novými souřadnicemi x' a y' platí transformace rotace o úhel φ :

$$x = x' \cdot \cos \varphi - y' \cdot \sin \varphi, \quad y = x' \cdot \sin \varphi + y' \cdot \cos \varphi \quad (16)$$

- resp.

$$x' = x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi, \quad y' = x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi \quad (17)$$

- Protože algoritmus neuchovává informace o původních bodech, ze kterých jedinec (elipsa) vznikl, je potřeba odvodit pro rotaci elipsy transformace koeficientů obecné rovnice elipsy. Dosadíme-li (16) do (11) a dostaneme porovnáním koeficientů u jednotlivých členů vztahy:

$$\begin{aligned} a_{11}' &= a_{11} \cos^2 \varphi + 2a_{12} \cos \varphi \sin \varphi + a_{22} \sin^2 \varphi \\ a_{12}' &= -a_{11} \cos \varphi \sin \varphi + 2a_{12} \cos \varphi \cos \varphi - a_{12} + a_{22} \cos \varphi \sin \varphi \\ a_{22}' &= a_{11} \sin^2 \varphi - 2a_{12} \sin \varphi \cos \varphi + a_{22} \cos^2 \varphi \\ a_{13}' &= a_{13} \cos \varphi + a_{23} \sin \varphi \\ a_{23}' &= -a_{13} \sin \varphi + a_{23} \cos \varphi \\ a_{33}' &= a_{33} \end{aligned} \quad (18)$$

- Pro nenatočenou elipsu platí pro poloosy:

$$a = \frac{1}{|a_{11}'|} \sqrt{\frac{a_{22}'^2 + a_{13}'^2 - a_{11}' a_{22}' a_{33}'}{a_{22}'}}, \quad b = \frac{1}{|a_{22}'|} \sqrt{\frac{a_{22}'^2 + a_{13}'^2 - a_{11}' a_{22}' a_{33}'}{a_{11}'}} \quad (19)$$

Postup vygenerování jedince je tedy takový, že se z hranové reprezentace vybere náhodně pět bodů. Spočítají se parametry elipsy a zkontroluje se, zda se jedná o reálnou elipsu. Je možné provádět kontrolu také na rozměry elipsy. Jestliže není jedinec v pořádku, proběhne nový pokus o vytvoření jedince.

4.1.2 Hodnotící funkce

Hodnotící funkce slouží k porovnání kvality jedinců mezi sebou. Je definována jako podobnost elipsy určené chromozomem s elipsou ve snímku. Podobnost lze popsat vztahem:

$$S = \frac{\sum_{(x,y)} E(x+i, y+j)}{\#total}, \quad (20)$$

kde $E(x+i, y+j)$ vrací 1, když v okolí bodu (x, y) ležícího na elipse, leží bod v obraze. $\#total$ je celkový počet bodů ležících na elipse. Kritérium S má hodnoty v rozsahu $<0, 1>$, kde 1 je nejlepší shoda a 0 nejmenší.

Modifikováním funkce E , tak že vrací hodnotu v rozmezí 0 až 1 a penalizuje tak vzdálenost bodu ležícího na elipse od bodu hranové reprezentace, je možné zjemnit kritérium. Pro projití bodů ležících na elipse daného chromozomu lze použít Bresenhamův algoritmus k vykreslování elipsy. Algoritmus je výhodný, protože umožňuje počítat jen čtvrtinu elipsy a zbytek doplnit z podobnosti. Navíc je možné počítat v celočíselné aritmetice. V programu probíhá výpočet funkce E tak, že je vykreslena elipsa jedince a vytvořena distanční mapa hranové reprezentace. Elipsa je použita jako maska na distanční mapu. Sumací výsledku maskování přes všechny řádky dostaneme hodnotu čitatele v (20).

4.1.3 Selektce, křížení, mutace, elitismus

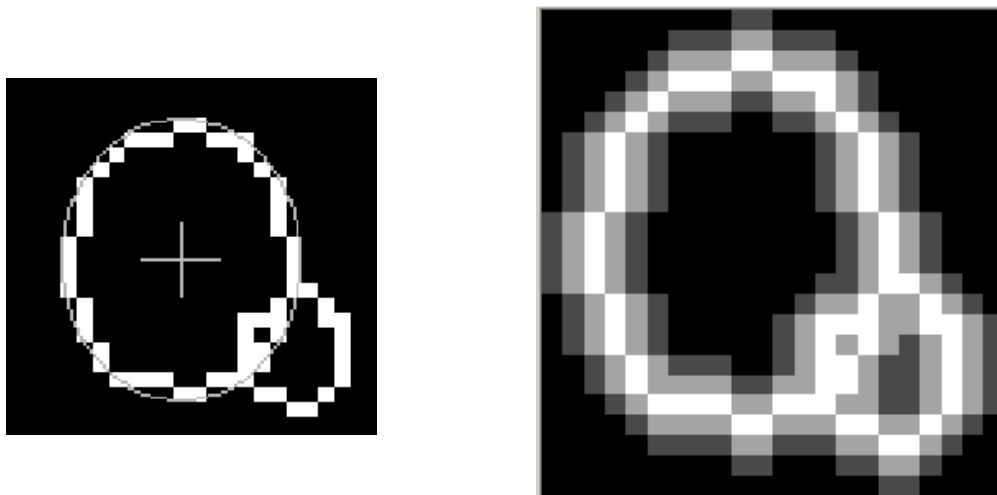
Selektce slouží k výběru jedinců do další generace. Je použita metoda ruletového výběru, kdy pravděpodobnost výběru daného jedince je přímo úměrná jeho relativnímu hodnocení. Selektce nevytváří žádné nové jedince, a tedy sama nepřispívá ke konvergování k řešení.

Křížení je mechanismus, kdy algoritmus vytváří z jedinců nové a doufá, že budou mít lepší vlastnosti. Křížení proběhne s danou pravděpodobností mezi dvěma jedinci tak, že si mezi sebou vymění polovinu genů – tedy bodů, kterými jsou definovány elipsy. Nově vzniklý jedinec je kontrolován, zda popisuje reálnou elipsu s parametry ležícími v očekávaném rozsahu, a je-li vše v pořádku je přidán do nové generace.

Mutace slouží k dohledání přesnějšího řešení v prostoru parametrů a je realizována prostým posunutím souřadnic genu. Jestli daný jedinec zmutuje je určováno náhodně. Který gen v chromozómu bude mutován, je pak také vybíráno náhodně, stejně jako síla (posunutí souřadnic) případné mutace.

Elitismus je mechanismus, kdy je část nejlepších (elitních) jedinců převedena beze změny do nové generace. Elitismus je užíván, aby bylo zaručeno předání nejlepšího řešení do další generace a vývoj kvality během generací měl neklesající charakter.

Pro otestování algoritmu je generována elipsa spolu s menší elipsou simulující poruchu například od odlesku (viz. Obr. 25). Střed zorničky GA určí se směrodatnou odchylkou $\sigma_{GA} = 0,1$ bodu.



Obr. 25: Testování genetického algoritmu




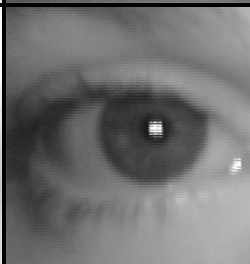




4.2 Zvláštnosti snímání oka

Díky tomu, že oko se chová jako objektiv s automatickou clonou, můžeme narazit na problémy při snímání světlé zorničky. Snímání světlé zorničky by mělo probíhat při osvětlení zdrojem světla umístěným na optické ose kamery. Toho nelze dosáhnout, a proto světelný zdroj umístíme co nejbližší objektivu. S rostoucí vzdáleností se zmenšuje úhel mezi optickou osou a směrem osvětlení a efekt je tedy se vzdáleností výraznější. Aby bylo snímání možné ve všech směrech, měli by mít světelné zdroje velké vyzařovací úhly.

V prostoru, ve kterém probíhá snímání, by mělo být šero, neboť zornička je v tmavém prostředí více roztažená a světelný zdroj tak lépe osvětluje zadní stěnu oka. Vliv na roztažení zorničky má také jas monitoru.

Ve většině případů nastane problém s nedostatečným rozsvícením zorničky, kterou lze kompenzovat regulací intenzity osvětlení, případně množstvím okolního světla. Lze předpokládat, že při použití intenzivnějšího osvětlení by bylo možné snímat světlou zorničku i za běžných světelných podmínek. Narazíme však na hranici bezpečné úrovně neviditelného světelného záření. V následující tabulce je uvedeno srovnání síly efektu světlé zorničky při různých světelných podmínkách, vzdálenosti a při použití (nepoužití) IR filtru.

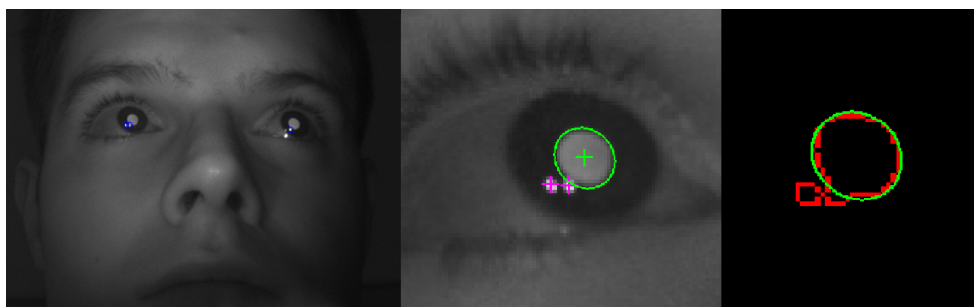
Tabulka 2: Snímání oka

		Zdálky	Zblízka
Normální	Světlo		
	šero		
IR filtr	světlo		
	šero		

4.3 Výsledky zpracování obrazu

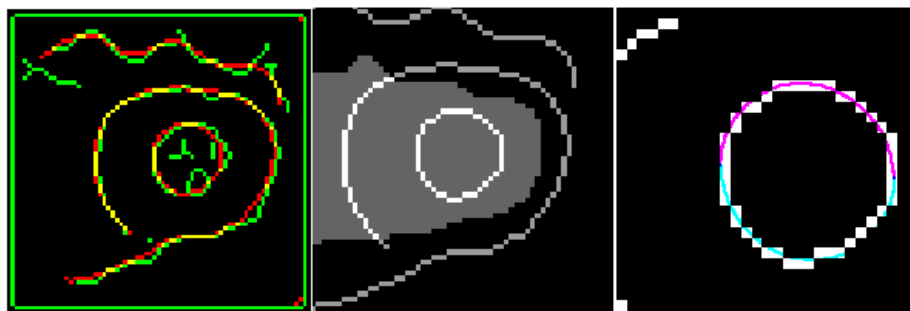
Algoritmy pro segmentaci a popis oka byly navrženy v programu MATLAB a následně byly implementovány v jazyce C++. Byly vytvořeny třídy pro práci s obrazem oka a třídy implementující genetický algoritmus hledání elipsy. Třídy použity v programu *Eyetracking*, který demonstruje jejich funkci. Program umožňuje změnu parametrů výše popsaných algoritmů a sledovat jejich vliv. Bližší popis funkcí a funkce programu je uveden v programové dokumentaci na přiloženém CD.

Na následujících obrázcích jsou shrnuty výsledky segmentace a popisu obrazu.



Obr. 26: Zpracování obrazu: celkový pohled, segmentace odlesků a elipsa zorničky (GA)

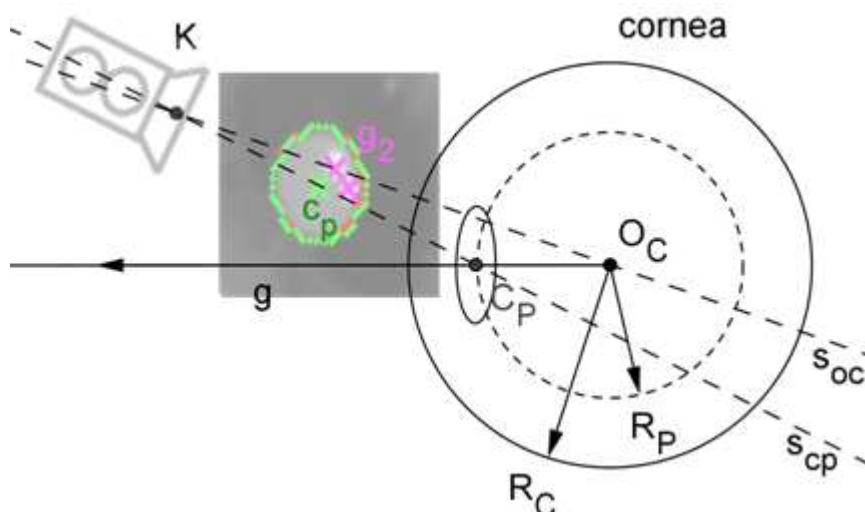
Obr. 27 srovnává hranovou reprezentaci vytvořenou Cannyho detektorem při použití Gaussova a mediánového filtru. Je zde názorně vidět, jak mediánový filtr pomáhá s odstraněním šumu a jak výrazně se zlepší kvalita detekovaných hran. Uprostřed je šedě vyznačena oblast hranice zorničky získaná morfologickými operacemi. Při změnách světelných podmínek může tato oblast zasahovat i mimo oblast duhovky a v hranové reprezentaci přibudou hrany přechodu bělmo-duhovka. Genetický algoritmus je natolik robustní, že upřednostní hranu zorničky před hranou duhovky.



Obr. 27: Hranování Cannyho detektorem (zelená – Gaussův filtr, červená – mediánový filtr), maska oblasti duhovky, nalezená aproximace zorničky elipsou

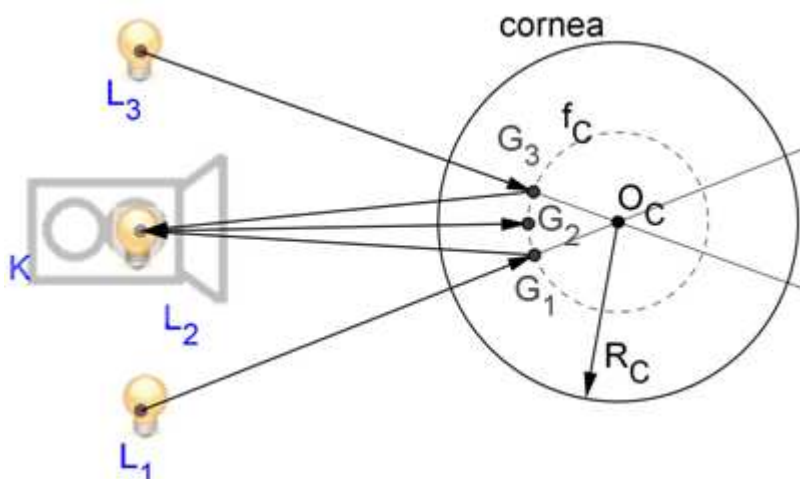
5 PARAMETRY OKA

Mezi parametry oka řadíme jeho polohu (resp. polohu středu křivosti rohovky O_C), prostorovou polohu zorničky C_P a poloměry křivosti rohovky R_C a vzdálenosti zorničky R_P .



Obr. 28: Parametry oka

Polohu středu křivosti rohovky určujeme z polohy odlesků zdrojů světla. Zdroje světla jsou tři a značíme je L_1 , L_2 a L_3 . Jejich virtuální obrazy se vytvoří v ohniskové vzdálenosti rohovky a značíme je G_1 , G_2 a G_3 . Ohnisková vzdálenost f je rovna polovině poloměru křivosti ($f = R_C/2$) a vytváří soustřednou kouli f_C s koulí rohovky. Kamera promítne polohy těchto obrazů do snímku jako odlesky, které značíme g_1 , g_2 a g_3 . Střed zorničky C_P kamera promítne do snímku, kde jej značíme c_p .



Obr. 29: Scéna: poloha LED a odlesků

5.1 Určení polohy oka a polohy zorničky

Protože zdroj světla L_2 leží téměř v ose kamery, vytváří se virtuální obraz G_2 na přímce KO_C resp. L_2O_C a označíme ji s_{oc} . Podle vztahu (21) je možné nalézt směrnici q_2 spojnice L_2O_C výpočtem z bodu g_2 a inverzní projekční matice A .

$$q_2 = A^{-1} \cdot g_2$$

$$\begin{bmatrix} u_{g2} \\ v_{g2} \\ w_{g2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{g2} \\ y_{g2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

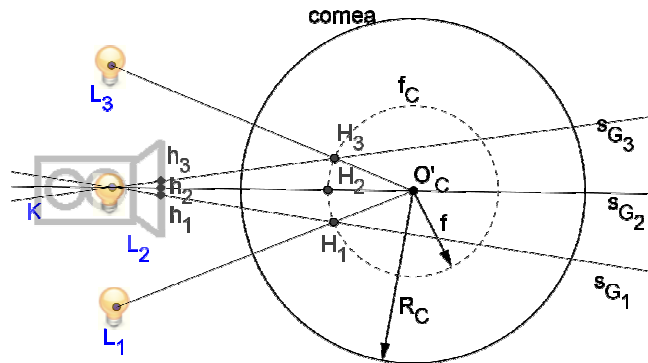
Pro přímku s_{oc} platí parametrické vyjádření (22). Vektor \mathbf{b} , je poloha bodu, jímž přímka prochází, a který určuje pozici přímky v prostoru. Pro případ s_{oc} se jedná o polohu kamery $[0, 0, 0]$.

$$s_{oc}: \begin{bmatrix} x_{soc} \\ y_{soc} \\ z_{soc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{g2} \\ v_{g2} \\ w_{g2} \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}, t \in R \quad (22)$$

Polohu bodu O_C tedy postačí hledat na přímce s_{oc} . Hledání samotné probíhá srovnáváním změřených poloh odlesků g_1, g_2 a g_3 s polohou teoreticky určených odlesků h_1, h_2 a h_3 (více v kapitole 5.1.2).

5.1.1 Teoretické odlesky

Polohy teoretických odlesků určujeme následujícím postupem. Ve zvoleném bodu O'_C na přímce s_{oc} (resp. s_{G2}) konstruujeme kouli f_C o poloměru f . V dalším kroku sestrojíme teoretické obrazy H_1, H_2 a H_3 virtuálních obrazů G_1, G_2 a G_3 . Obrazy H_1, H_2 a H_3 leží na průsečíku přímek $L_1 O'_C, L_2 O'_C$ a $L_3 O'_C$ s koulí f_C . Podle vztahu (3) – bez rotace a posunutí – promítneme H_1, H_2 a H_3 do obrazové roviny, čímž dostaneme polohu teoretických odlesků h_1, h_2 a h_3 .



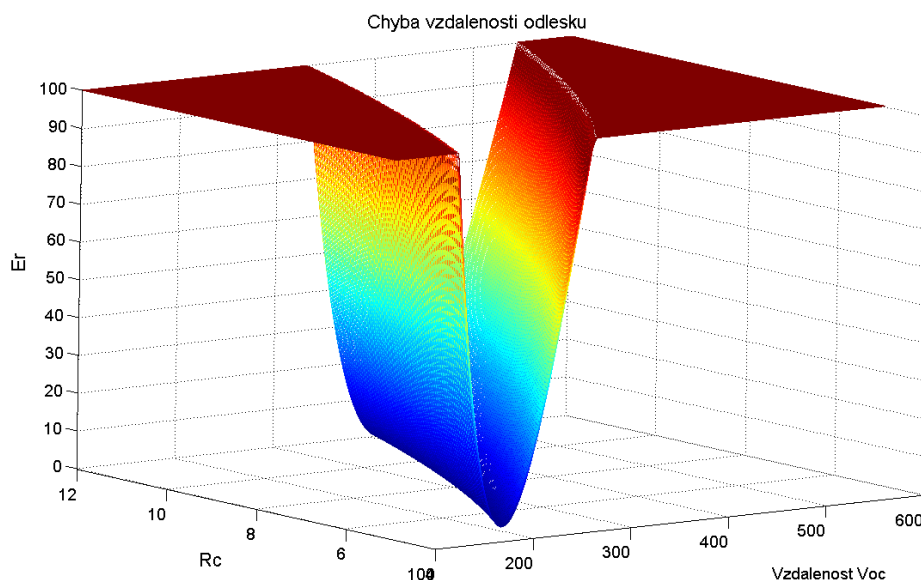
Obr. 30: konstrukce teoretických odlesků

5.1.2 Porovnávání odlesků

Nyní víme, jak se nám zobrazí v kameře teoretické odlesky od LED v případě, že oko (koule rohovky) leží na přímce s_{oc} (resp. s_{G2}). Problém hledání prostorové souřadnice polohy O_C se zjednodušil na hledání *vzdálenosti* bodu O_C od kamery - $v_{OC}=|O_C K|$. Pro určení konkrétní polohy na přímce je třeba porovnat teoretické odlesky h_1, h_2 a h_3 s odlesky změřenými g_1, g_2 a g_3 . Kritériem pro porovnání správnosti polohy O'_C na s_{oc} je suma kvadrátů odchylek vzdáleností mezi odlesky. Kritérium je popsáno obecným matematickým vztahem (23), ve kterém k značí index odlesku LED kamery.

$$Er = \sum_{i=\{\text{odlesky}\}-k} \left(|g_k g_i| - |h_k h_i| \right)^2 \quad (23)$$

Modelový příklad závislost kritéria na vzdálenosti v_{OC} a na poloměru křivosti rohovky R_C je zobrazen na Obr. 31. Teoreticky pro jakýkoli poloměr rohovky R_C lze nalézt vzdálenost, kdy bude chyba vzdálenosti odlesků nulová. Bez znalosti poloměru křivosti rohovky nelze vzdálenost jednoznačně určit.



Obr. 31: Chyba vzdálenosti odlesků

Program iteruje k řešení pomocí metody půlení intervalů, přičemž se rozhoduje na základě znaménka 1. derivace. Postup určení vzdálenosti oka z intervalu d_{min} až d_{max} ukazuje následující pseudokód.

```
d1 = dmin;
dr = dmax;

d = abs(d1-dr);
dc = 0.0;
while ( d>eps )
```

```

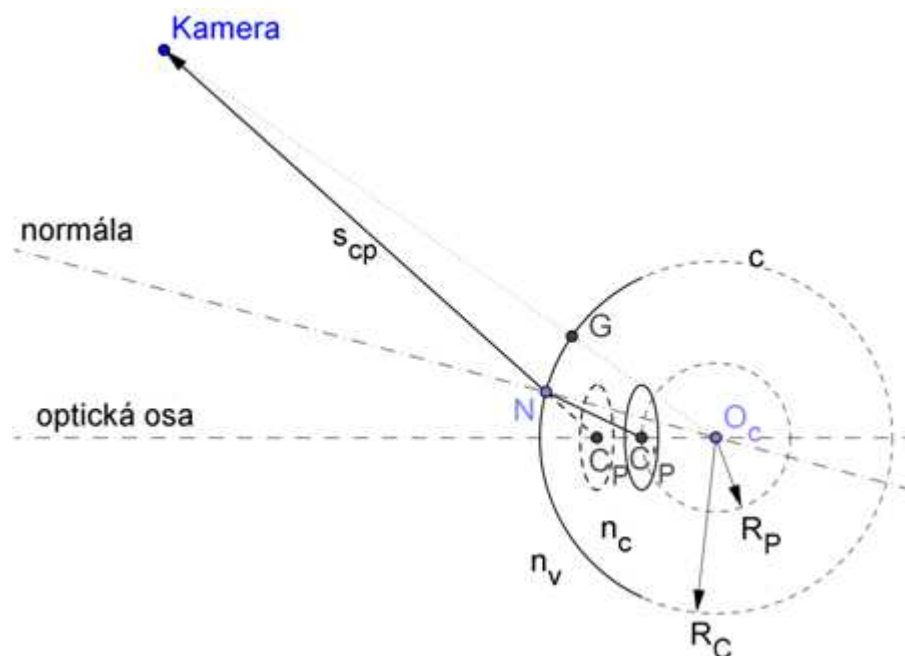
{
d = d/2.0;
dc = (dl+dr)/2.0;
Sc = calcCorneaCenter(dc, smer); // určení polohy  $S_c$  ve vzdálenosti dc
Sce = calcCorneaCenter(dc+eps, smer); // ve vzdálenosti dc+eps
double ddc = ( Err(Sce) - Err(Sc) ) / eps; // výpočet derivace
if( ddc < 0.0)    dl = dc;
else             dr = dc;
}

```

5.1.3 Určení polohy středu zorničky

Za předpokladu, že máme určenou polohu středu rohovky O_C , můžeme určit polohu středu zorničky C_P . Jak je vidět na Obr. 28 kamera snímá střed zorničky C_P jako bod c_p . Obdobně jako pro přímkou s_{oc} a bod g_2 ve vztazích (21) a (22) lze určit přímkou s_{cp} z bodu c_p v obraze. Předpokládá se, že zornička leží v konstantní vzdálenosti R_P od středu křivosti rohovky O_C a že tedy leží na soustředné kouli se středem O_C a poloměrem R_P . Přesnou polohu určíme jako průsečík této koule a přímky s_{cp} .

Uvedený postup lze rozšířit a uvažovat lom světla na rozhraní vzduch – rohovka. Obr. 13 říká, jaké indexy lomu se v oku vyskytují. Vzduch má index lomu $n_v=1$ a rohovka $n_c=1,376$. Na rozhraní dvou optických prostředí s různou rychlostí šíření světla (tedy i indexem lomu) dochází k lomu paprsku. Přitom platí, že paprsek zůstává v rovině dopadu a při dopadu do opticky hustšího prostředí (větší index lomu n , menší rychlost šíření světla v) se láme ke kolmici a při dopadu do opticky řidšího od kolmice.



Obr. 32: Lom paprsku

Obr. 32 ukazuje situaci při lomu paprsku na kulovém povrchu rohovky. Bod N leží na průsečíku povrchu rohovky a přímky s_{cp} a získáme jej jako průsečík přímky s_{cp} a koule se středem O_C a poloměrem R_C .

Úhel dopadu α svírají vektory $\overrightarrow{NP_O}$ a $\overrightarrow{NO_C}$. Pro velikost úhlu α platí:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\overrightarrow{N - P_O} \cdot \overrightarrow{N - O_C}}{\|\overrightarrow{N - P_O}\| \cdot \|\overrightarrow{N - O_C}\|} \quad (24)$$

Pro úhel lomu β pak z rovnice lomu platí:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_c}{n_v} \quad (25)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{n_v}{n_c} \sin \alpha \quad (26)$$

O rozdíl úhlů $\gamma = \alpha - \beta$ je nutné změnit směr paprsku v bodě N. Tato změna nastane v rovině dopadu, tedy v rovině KP_OO_C . Rotace tedy probíhá kolem normálového vektoru roviny o úhel γ . Rotační matici lze spočítat Rodriguezovou transformací (6).

5.1.4 Průsečík přímky a koule

Při řešení polohy oka a středu zorničky je třeba počítat průsečíky přímky a koule. Tato kapitola uvádí jak, přitom je vycházeno z [26].

Hledáme průsečík koule se středem S a poloměrem r s přímkou p. Dále označíme A bod ležící na přímce, q směrový vektor přímky. Zavedeme-li dále $P = A - S$, můžeme psát pro rovnici přímky:

$$\begin{aligned} X &= [X_x, X_y, X_z] \\ A &= [a_x, a_y, a_z] \\ S &= [s_x, s_y, s_z] \\ X &= A + t\vec{q} \end{aligned} \quad (27)$$

Do rovnice koule můžeme dosadit bod X:

$$(X_x - s_x)^2 + (X_y - s_y)^2 + (X_z - s_z)^2 = r^2 \quad (28)$$

Po roznásobení

$$t^2 \cdot [q_x^2 + q_y^2 + q_z^2] + 2 \cdot t \cdot [q_x \cdot p_x + q_y \cdot p_y + q_z \cdot p_z] + [p_x^2 + p_y^2 + p_z^2] - r^2 = 0 \quad (29)$$

Pro členy kvadratické rovnice potom platí:

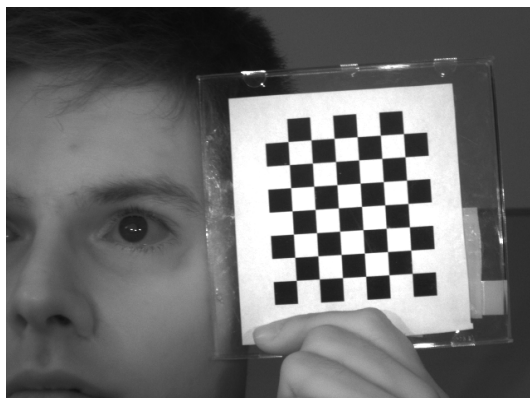
$$\begin{aligned}
 a &= |Q|^2 \\
 b &= 2 \cdot (P \cdot Q) \\
 c &= |P|^2 - r^2 \\
 a \cdot t^2 + b \cdot t + c &= 0
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

Vypočtením kvadratické rovnice (30) získáme parametr t (vzdálenost bodu A od průsečíku). Je-li diskriminant větší jak 0, jsou řešením dva průsečíky, jinak je-li rovno nule, má úloha pouze jedno řešení. V případě dvou řešení vybíráme vždy to bližší – viditelné, to které má menší vzdálenost od bodu A.

5.2 Kalibrace poloměru rohovky

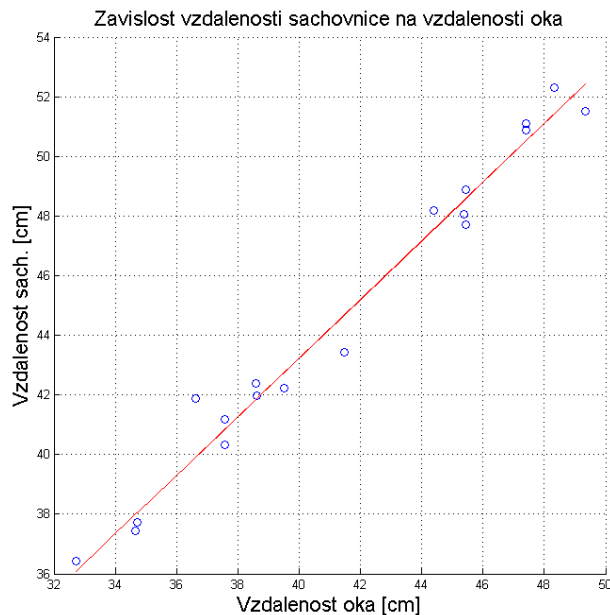
Pro určení polohy středu křivosti rohovky C_P je nutné znát poloměr křivosti rohovky R_C . Tento poloměr se může pro každé oko i každého člověka lišit a je nutné jej změřit.

V kapitole 5.1.2 je ukázáno, že R_C není možné určit bez znalosti vzdálenosti oka od kamery. Proto je pro kalibraci nasnímána série snímků oka spolu se šachovnicí (viz. Obr. 33).



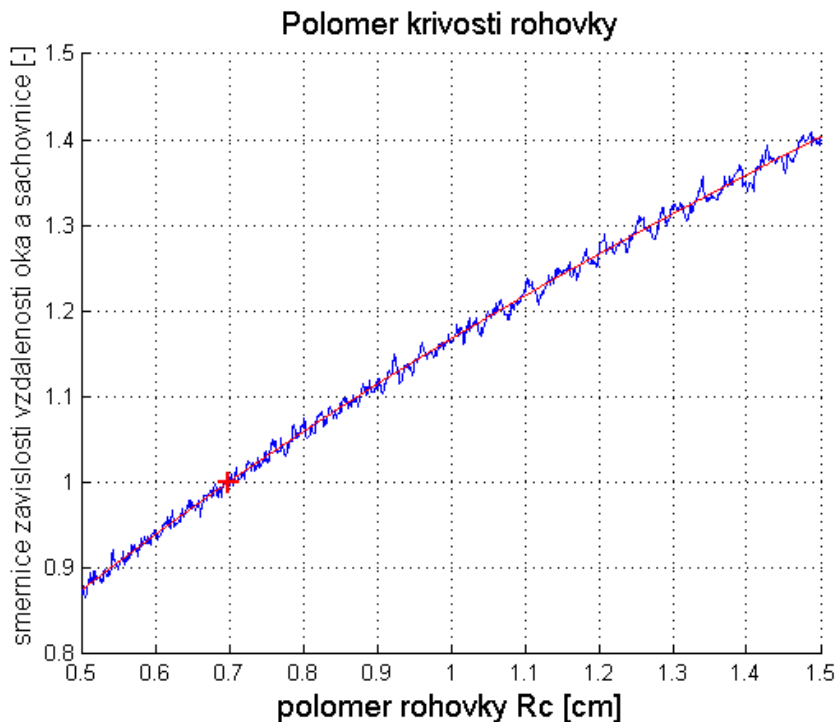
Obr. 33: Kalibrační snímek R_C

Pro každý snímek je metodou dle 5.1.2 je vypočtena vzdálenost oka při zvoleném R'_C . Zároveň je určena vzdálenost šachovnice pomocí funkcí knihovny OpenCV. V případě, že máme správně určenou hodnotu $R'_C = R_C$ a že je v kalibračních snímcích šachovnice vůči oku stále ve stejné poloze, bude se závislost vzdálenosti šachovnice na vzdálenosti oka blížit lineární závislosti se směrnici 1. V případě, že poloměr R_C není zvolen přesně, závislost se bude také blížit lineární, ale její směrnice se odchýlí od 1. Cílem kalibrace je najít takový poloměr R'_C , aby se směrnice blížila 1.



Obr. 34: Závislost vzdalenosti šachovnice na vzdalenosti oka

Pro určení správné hodnoty R_C je vynesena závislost směrnic na poloměru R'_C , proložena polynomem 3. řádu. V nalezené aproximaci je vybrána hodnota R_C pro směrnicí rovnu 1. Tímto postupem lze vcelku přesně kalibrovat metodu určování vzdálenosti O_C , potažmo polohy oka. Orientačně lze stanovit přesnost metody určení vzdálenosti vůči šachovnici ($\sigma_{R_C} = 0.8$ cm), kde ale podstatnou část nejistoty tvoří vůle mezi okem a přidržanou šachovnicí.

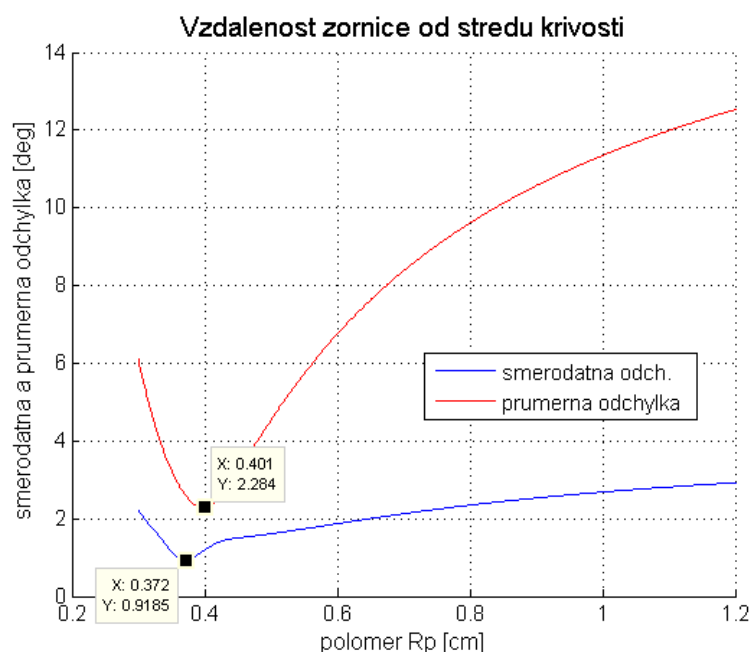


Obr. 35: Určení poloměru křivosti rohovky

5.3 Kalibrace vzdálenosti zorničky

Jak je psáno v kapitole 5.1.3, pro určení polohy středu zorničky je mj. potřeba poloměr R_p . Poloměr má vliv na rozptylování výsledného směru pohledu. Čím menší je, tím se směr více rozptyluje. Je-li menší, rozptylování se zmenšuje. Má tedy zásadní vliv na přesnost. Tohoto faktu je využito při kalibraci, kdy je minimalizován rozptyl úhlových odchylek změřeného a správného vektoru pohledu.

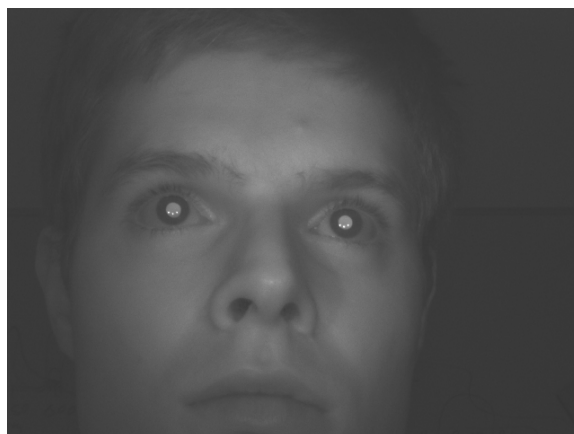
Je pořízena sada snímků s pohledy na pravidelnou mříž bodů M zobrazených na obrazovce. Pro snímky v sadě jsou určeny polohy očí O_C , a polohy středů zorniček c_p . Pro různé R_p je poté počítán vektor směru pohledu a jsou počítány úhlové odchylky od příslušného vektoru $O_C M$. Závislost průměrné a směrodatné odchylky je vynesena v grafu (Obr. 36). V grafu jsou vyznačeny hodnoty R_p , kde vynesené závislosti dosahují minima. Rozdíl mezi minimy může být způsoben odchylkou optické osy od osy vidění.



Obr. 36: Kalibrace R_p

6 EXPERIMENT

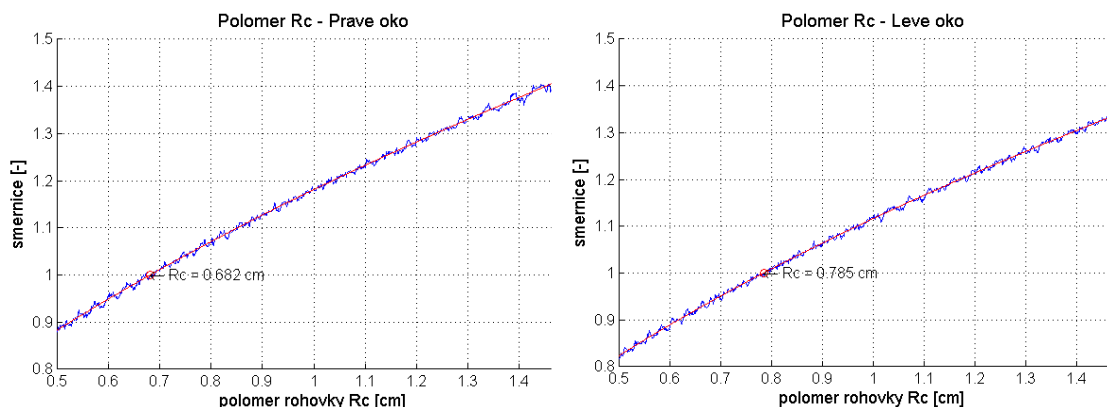
Možnosti metody jsou prezentovány na pokusu, kdy byly uživateli promítnuty série bodů na obrazovku, na které se měl dívat. Body byly promítány postupně v matici 4x6 a jejich vzdálenost byla 5,2x5 cm. Pro každý předložený bod bylo pořízeno několik snímků celého obličeje se změnou polohou hlavy. V měřicí sestavě byla použita kamera Imaging Source DMK 21BF04 s rozlišením 640x480 bodů. Měřená osoba mohla pohybovat hlavou v rámci zorného pole kamery. Vzdálenost osoby od kamery se pohybovala od 40 cm do 50 cm.



Obr. 37: Vstupní snímek

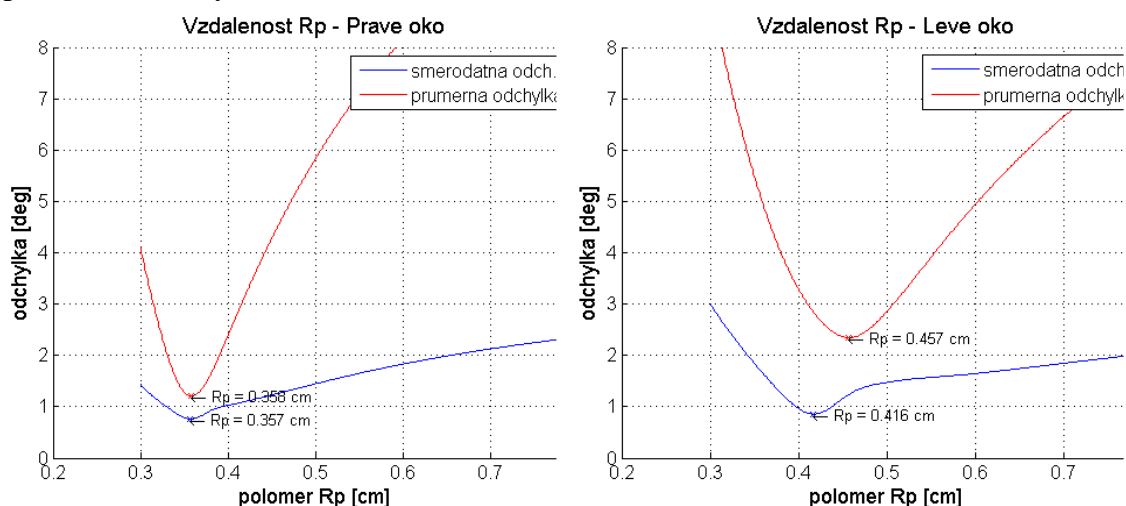
Tyto snímky byly zpracovávány pomocí programů a skriptů vytvořených podle teoretických základů popsaných v předešlých kapitolách. Pořízení snímků je možné provést jakýmkoli SW pracujícím s kamerou. Byl použit vytvořený program *Eytracking* v režimu snímání kamery, který dovoluje automatické pojmenování ukládaných snímků.

Pro kalibraci poloměru křivosti rohovky slouží program *Kalibrace_oka_RC*. Program vygeneruje textový soubor se závislostí směrnice na poloměru R_p (viz. 5.2). Pomocí skriptu *Kalibrace_Rc.m* je ze závislosti nalezen poloměr rohovky. Průběhy z kalibrace jsou na Obr. 38. Měření rohovky probíhá pro každé oko zvlášť. Výsledky uvádí Tab. 3.



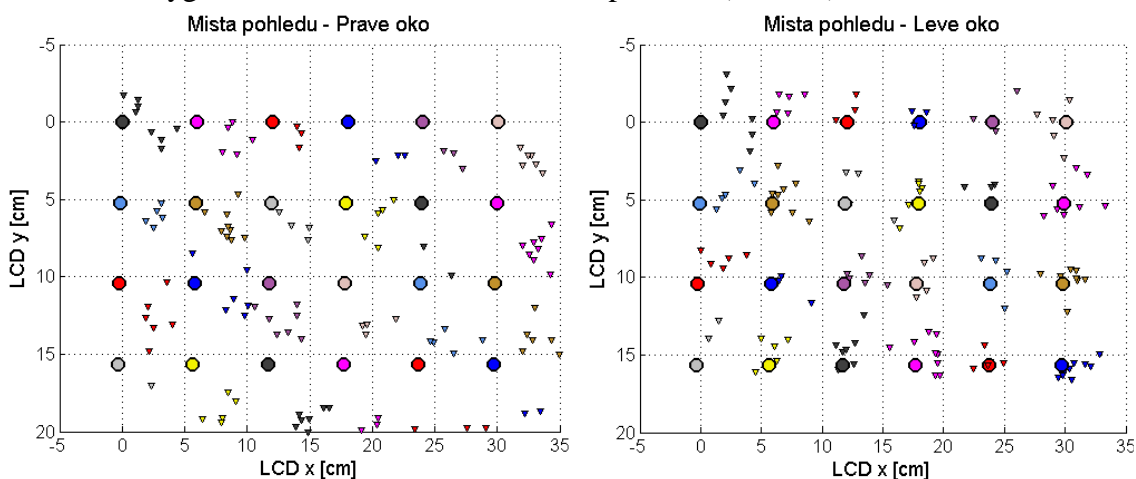
Obr. 38: Kalibrace R_C

Kalibrace vzdálenosti zorničky R_p je provedena pomocí programu *Kalibrace_oka_RP*. Tento program generuje uživateli kalibrační body, uživatel potvrzuje pohledy. Výsledkem je textový soubor se závislostí rozptylu a průměrné odchylky na vzdálenosti R_p . Získaná data zpracovává skript *Kalibrace_Rp.m*, který vygeneruje graf (Obr. 39) a určí R_p pro minimální směrodatnou odchylku a minimální průměrnou odchylku.



Obr. 39: Kalibrace R_p

Vlastní určení směru pohledu bylo provedeno programem *Eyetracking.exe*. Programu musí být zadány parametry oka a údaje o poloze LED. Pro předložené snímky jsou vygenerovány textové soubory s informacemi pro pravé a levé oko. Pomocí skriptu *Místo_pohledu.m* jsou zpracována data, vypočtena poloha pohledu v rovině monitoru a vygenerována schémata rozmístění pohledů (Obr. 40).



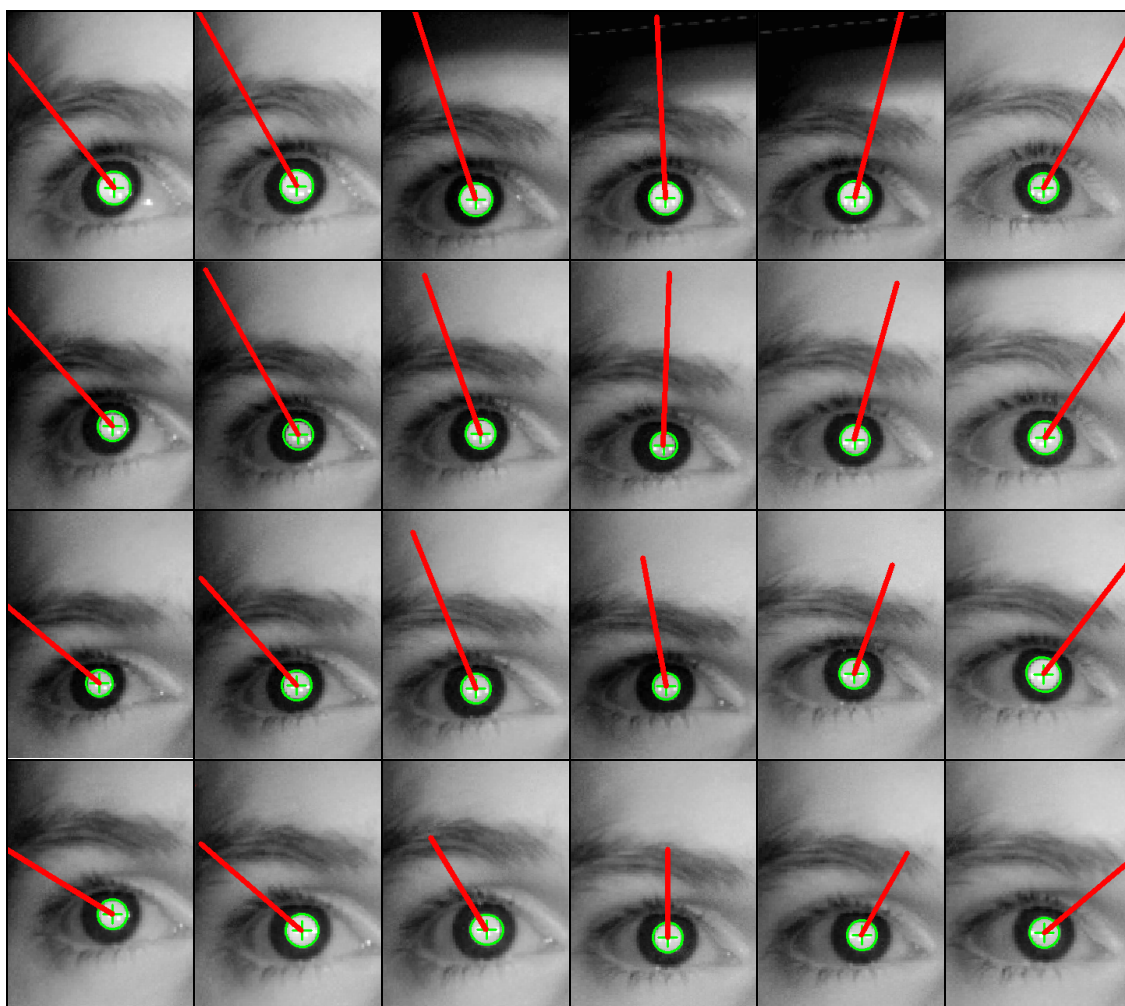
Obr. 40: Místa pohledu (o – zobrazený bod, Δ – místo pohledu)

Přesnost měření je vyjádřena průměrnou odchylkou Δ a směrodatnou odchylkou opakovatelnosti s (Tab. 3). V tabulce jsou také shrnuty změřené parametry očí. Příklady

znázornění směrů pohledu pravého oka pro jednotlivé předložené body zobrazuje Obr. 41.

Tab. 3: Kalibrace oka

	Pravé oko	Levé oko
R_C [cm]	0,682	0,785
R_P [cm]	0,357	0,416
Δ [°]	2,17	2,41
s [°]	1,16	1,25



Obr. 41: Směry pohledu

6.1 Srovnání

Srovnání je převzato z [5]. Jsou vybrány projekty, které umožňují volný pohyb hlavy. Všechny uvedené projekty vznikly v posledních sedmi letech a používají jednoduchou

kalibraci, srovnatelnou s kalibrací navrženou v této práci. Tabulka 4 srovnává metody na základě umožněného rozsahu pohybu a dosažené přesnosti.

Tabulka 4: Srovnání metody

Metoda	Možný rozsah pohybu (osa z)	Průměrná odchylka	Popis
[10]	< 70 mm	0,8°	1x stereo-kamera, sledování oka
[8]	Ne, ale >70mm	0,6°	2x stereo-kamera, sledování tváře a oka
Náš	cca 100 mm	2,0°	Jediná kamera, sledování oka
[5]	cca 200 mm	1,6°	1x stereo-kamera (640x480), sledování oka
[24]	cca 500 mm	5,0°	Jediná kamera, sledování oka
[13]	cca 40 mm	0,9°	Jediná kamera, sledování oka

Ze srovnání je možné usoudit, že navržená metoda podává srovnatelné výsledky s metodami podobného typu, přestože není provedena kalibrace odchylky optické osy s osou vidění. To přesnost naší metody dělá závislou na vlastnostech konkrétního oka. Vzhledem ke změřenému rozptylu lze odhadnout, že po korekci odchylek os by metoda dosahovala podobných výsledků jako [5] či [13]. Dalšího zpřesnění by bylo možné dosáhnout použitím kamery s vyšším rozlišením.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou určování směru pohledu očí a zjištění místa, na které osoba upírá zrak. Je uveden přehled a popis metod, na základě kterých byl navržen postup pro detekci směru pohledu a bylo navrženo snímací zařízení. Pro volbu metody byl rozhodující počet kamer pro snímací zařízení a také to, aby uživatel nemusel používat žádné jiné pomůcky. Realizována byla metoda přímého určení 3D směru pohledu, kdy je směr pohledu oka určován ze středu křivosti rohovky a prostorového středu zorničky. Metoda je popsána v kapitole 3 a problematiku určení středu křivosti a středu zorničky popisuje kapitola 5.1. Měřicí zařízení se sestává z jediné kamery a třech zdrojů světla (IR LED).

Uživatel je snímán kamerou a střed křivosti rohovky je určen z polohy odlesků tří IR LED v oku uživatele. Metoda vyžaduje přesné určení poloh diod a kalibračních vzorů. Byla navržena metoda pro měření polohy pomocí kamery, kdy je možné s pomocí zrcadla měřit body i mimo zorné pole kamery. Vypracovaným postupem je možné měřit rozměry objektu v řádech mm. Kalibrace jsou popsány v kapitolách 3.3 a 3.4.

Bylo potřeba vyřešit vyhledání oka v obraze a určit na něm polohu odlesků od světelných zdrojů a polohu zorničky. Pro detekci oka bylo využito Haarových detektorů implementovaných v knihovně OpenCV. Pro snadnější segmentaci hrany zorničky probíhá snímání tzv. světlé zorničky. Postřehy pro její úspěšné nasnímání jsou shrnuty v kapitole 4.2.

Algoritmy pro detekci a popis zorničky a pro určení odlesků od LED byly navrženy v jazyce MATLAB a implementovány v jazyce C++. Zpracování obrazu je popsáno v kapitole 4. Pro popis zorničky jako elipsy byl navržen genetický algoritmus. Genetický algoritmus byl zvolen proto, že klasické metody jako Haughova transformace nebyly schopny detekovat elipsu v obraze s malým rozlišením (velikost oblasti oka je přibližně 100x100 bodů a oblast zorničky 16x16 bodů). Výsledkem je obecně použitelný algoritmus pro detekci elipsy schopný určit střed zorničky se směrodatnou odchylkou $\sigma_{GA} = 0,1$ bodu. V jazyce C++ byly navrženy třídy pro nalezení středu zorničky a poloh odlesků.

Metodika stanovení středu křivosti rohovky (polohy oka) je popsána v kapitole 5.1. Vzdálenost oka od kamery určujeme se směrodatnou odchylkou do 1 cm, která je oproti vzdálenosti pozorovatele (cca 40 cm) pro metodu určení pohledu akceptovatelná. Metody pro určení místa pohledu jsou zmíněny v kapitole 3.5. Experiment popsáný v kapitole 6 demonstruje určení místa a směru pohledu. Místo pohledu je hledáno v ploše obrazovky, na kterou jsou promítány testovací body. Přesnost měření je vyhodnocena z odchylek směrů pohledu od směru k předloženému testovacímu bodu. Testované osobě je umožněn pohyb hlavy v rámci zorného pole kamery (prakticky cca 10 cm), který je omezen především nerovnoměrným osvětlením scény. Každý bod je

snímán opakovaně. Směrodatné odchylky opakovatelnosti byly stanoveny pro každý měřený bod a směrodatná odchylka opakovatelnosti celého měření byla určena jako jejich medián ($s_R = 1,16^\circ$ a $s_L = 1,25^\circ$). O správnosti metody vypovídá také to, že obě oči jsou snímány nezávisle a v obou případech dostáváme srovnatelné výsledky (viz. Tab. 3). Absolutní odchylka směru pohledu levého a pravého oka se vzájemně liší. Je to způsobeno odchylkou optické osy a osy vidění, která se může pro každé oko lišit. Odchylka osy vidění od optické osy z časových důvodů nebyla v algoritmu dosud implementována. Její určení závisí na poloze natočení oka kolem optické osy. Odchylka os způsobuje zdánlivou systematickou chybu viditelnou na Obr. 40.

O správnosti provedených měření svědčí také to, že parametry oka zjištěné při kalibraci odpovídají Gullstrandovu modelu oka (Obr. 13). Změřený poloměr křivosti pravého (levého) oka vyšel 0,682 cm (0,785 cm) oproti teoretickému 0,77 cm a vzdálenost zorničky pravého (levého) oka od středu křivosti vyšla 0,357 cm (0,416 cm) oproti teoretické 0,41 cm.

V další práci by měla být doplněna korekce odchylky osy vidění od optické osy spolu s optimalizací algoritmu pro hledání elipsy. Genetický algoritmus je vhodný pro paralelizaci, proto by bylo možné jít tímto směrem. Pro zvětšení rozsahu možného pohybu hlavy uživatele by bylo nutné vytvořit homogenní osvětlení. To by bylo možné provést zvýšením výkonu osvětlení a použitím difuzorů. Zároveň by pomohla automatická regulace intenzity osvětlení. Další zlepšení přesnosti by umožnila kamera s vyšším rozlišením. Metoda je vhodná spíše do budov s umělým osvětlením. Intenzivní denní světlo by přineslo problémy nepředvídatelnými odlesky a problém při pořízení světlé zorničky.

Literatura

- [1] Foto Román [online]. 3. ledna 2009 [cit. 2011-05-20]. Oko (a mozek) versus fotoaparát. Dostupné z WWW: <http://www.fotoroman.cz/techniques2/light_eye_camera.htm>.
- [2] Klimeš, J., (2001). Způsoby sledování pohybu zraku. *DIMAR s.r.o.*
- [3] Kozumplík, J., a kol., (2006). Analýza biologických signálů. *VUT Brno*
- [4] Mohamad, A., O., Da Silva, M., P., Courboulay, V, (2007). History of gaze tracking, in *HAL : hal-00215967, version 1*
- [5] Zhu, Z., Ji, Q., (2005). Novel Eye Gaze Tracking Techniques Under Natural Head Movement, in *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 12, Dec. 2007
- [6] Morimoto, C., H., Koons, D., Amir, A., Flickner, M., (2000). Pupil detection and tracking using multiple light sources, in *Image and Vision Computing*, Volume 18, Issue 4, 1 Mar. 2000, Pages 331-335
- [7] Richardson, D., C., Spivey, M., J., Eye Tracking, in *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering* , Feb. 2004
- [8] Zath. [online]. 20. května 2011 [cit. 2011-05-20]. Eye-Controlled Earphones For MP3 Players?. Dostupné z WWW: <<http://www.zath.co.uk/eye-controlled-earphones-for-mp3-players/>>.
- [9] Beymer, D., Flickner, M., “Eye gaze tracking using an active stereo head,” in *Proc. Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, pp. 451–458.
- [10] Shih, S., W., Liu, J., “A novel approach to 3-D gaze tracking using stereo cameras,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B*, vol. 34, no. 1, pp. 234–245, Feb. 2004.
- [11] Ohno, T., Mukawa, N., Yoshikawa, A., “Freegaze: A gaze tracking system for everyday gaze interaction,” in *Proc. Symp. ETRA 2002*, 2002, pp. 125–132.
- [12] Morimoto, C. H., Amir, A., and Flickner, M., “Detecting eye position and gaze from a single camera and 2 light sources,” in *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, 2002, pp. 314–317.

- [13] Guestrin, E., D., Eizenman, M., “General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections”, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, no. 6, pp. 1124–1133, Jun. 2006.
- [14] Böhme, M., Meyer, A., Martinetz, T., and Barth, E., (2006). Remote eye tracking: state of the art and directions for future development. *Proceedings of the 2nd COGAIN Conference*, pp. 12-17.
- [15] Li, D., Parkhurst, D. J., (2005). Starburst: A robust algorithm for video-based eye tracking. *Iowa State University, Ames, Iowa, 50011*
- [16] Fejtová, M., (2008). *Může být oko novým ovládacím prvkem?*. in *Automa 12/2008*
- [17] Air & Space Magazine [online]. 2007, 20. května 2011 [cit. 2011-05-20]. How do military aircraft helmets track where a pilot is looking?. Dostupné z WWW: <<http://www.airspacemag.com/need-to-know/NEED-helmets.html>>.
- [18] CH JHMCS [online]. 19. července 2008 [cit. 2011-05-20]. WWW.FLIGHTGEAR.CH. Dostupné z WWW: <http://www.flightgear.ch/CH%20JHMCS/ch_jhmcs.htm>.
- [19] Li, D., J., Parkhurst, D. J., (2005). openEyes: A low-cost head-mounted eye-tracking solution. *Iowa State University, Ames, Iowa, 50*
- [20] Graphics and Media Lab [online]. 6.02.2006 [cit. 2011-05-20]. GML C++ Camera Calibration Toolbox. Dostupné z WWW: <<http://graphics.cs.msu.ru/en/science/research/calibration/cpp>>.
- [21] Yao, J., Kharna, N., Grogono, N., „A multi-population genetic algorithm for robust and fast ellipse detection“, *Pattern Analysis & Application*, vol 8, noo 1-2, pp. 149-162, Aug. 2005
- [22] Trnečková, Š., Výskyt a rozložení refrakčních vad . Brno: Masarykova univerzita, Lékařská fakulta, 2006. 70 s. Vedoucí diplomové práce Mudr. Jan Richter
- [23] Zhang, Z., Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations
- [24] Kuželosečka. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kuželosečka>>.Math.slu.cz [online]. 19. ledna 2009 [cit. 2011-05-20].

- [25] 02teorie.pdf. Dostupné z WWW:
<<http://www.math.slu.cz/kos/0809/download/02teorie.pdf>>.
- [26] Beneda, T., Kmlinux [online]. 24. listopadu 2005 [cit. 2011-05-20]. Ukol1.pdf.
Dostupné z WWW: <<http://kmlinux.fjfi.cvut.cz/~benedtom/MTL/ukol1.pdf>>.
Z. Zhu and Q. Ji, „Eye and gaze tracking for interactive graphic display”,
Mach. Vis. Applicat., vol. 15, no. 3, pp. 139–148, 2004.

Seznam zkratek

O_C ... prostorová souřadnice středu křivosti rohovky
 C_P ... prostorová souřadnice středu zorničky
 c_P ... poloha středu zorničky v obraze
 O_r ... střed oční bulvy
 α_f ... velikost úhlové odchylky optické osy a osy vidění.
 L_1, L_2, L_3 ... souřadnice poloh LED 1, 2, 3
 K_1, K_2 a K_3 ... kamery 1, 2, 3
 G_1, G_2 a G_3 ... virtuální obrazy LED 1, 2, 3
 g_1, g_2 a g_3 ... odlesky, které jsou vidět v obraze
 H_1, H_2 a H_3 ... teoreticky určené virtuální obrazy LED 1, 2, 3
 h_1, h_2 a h_3 ... teoreticky určené odlesky v obraze
 R_C ... poloměr křivosti rohovky
 R_P ... vzdálenost zorničky od O_C
 f ... ohnisková vzdálenost ($f = R_C$)
 f ... koule se středem O_C a poloměrem f
 F ... ohnisko kulové plochy rohovky (leží na f)
 A ... projekční matice kamery
 f_x ... ohnisková vzdálenost ve směru osy x
 f_y ... ohnisková vzdálenost ve směru osy y
 $[c_x, c_y]$... střed optické osy
 R ... matice rotace
 \vec{t} ... vektor translace, sloupcový $[3 \times 1]$
 \vec{r} ... rotační vektor
 m ... obecný bod v obraze
 M ... obecný bod v prostoru
 s_{OC} ... spojnice kamery a středu křivosti rohovky
 s_{cp} ... spojnice kamery a středu zorničky
 v_{OC} ... vzdálenost O_C od kamery, $v_{OC} = |O_C K|$
 P_1, P_2, P_3, P_4 ... Purkyňovy odrazy
 IR ... infračervené
 LED ... dioda
 $PCCR$... pupil center cornea reflection technice

EOG ... elektrookulogram

Seznam příloh

Příloha 1. CD/DVD